COLLEGE DOCTORAL PAYS DE LA LOIRE

ED EDUCATION, COGNITION, LANGAGES, INTERACTIONS, SANTE

Nantes Université

THESE DE DOCTORAT

NANTES UNIVERSITE

ECOLE DOCTORALE N° 603
Education, Cognition, Langages, Interactions, Santé
Spécialité : Santé

Par **Andrew LAURIN**

Troubles de la conscience du corps dans le trouble de stress post-traumatique : de la compréhension à la thérapeutique, une approche intégrative

Thèse présentée et soutenue à l'UFR STAPS, le 24/11/2025
Unité de recherche : Mouvement, Interactions, Performances, MIP, UR 4334

Rapporteurs avant soutenance :

Philippe FOSSATI	Professeur des Universités – Praticien Hospitalier, APHP Pitié-Salpêtrière Sorbonne Université
Eric FAKRA	Professeur des Universités – Praticien Hospitalier, CHU Saint-Étienne Université Jean Monnet

Composition du Jury :

Président :	Mohamad EL HAJ	Professeur des Université, Nantes Université
Examinateurs :	Caroline DUBERTRET	Professeure des Universités – Praticien Hospitalier, APHP Hôpital Louis Mourir UPC
	Mélanie VOYER	Praticien Hospitalier, Centre Hospitalier Henri Laborit Poitiers
Dir. de thèse :	Anne SAUVAGET	Professeure des Universités – Praticien Hospitalier, Nantes Université
Co-dir. de thèse :	Thibault DESCHAMPS	Professeur des Universités, Nantes Université
Co-enc. de thèse :	Samuel BULTEAU	Professeur des Universités – Praticien Hospitalier, Nantes Université

Invité(s)

Wissam EL HAGE	Professeur des Universités – Praticien Hospitalier, Université de Tours
Abdel Halim BOUDOUKHA	Professeur des Universités, Nantes Université

Table des matières

REMERCIEMENTS **2**

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES **4**

LISTE DES ABRÉVITATIONS **6**

PARTIE 1 : ÉTAT DE L'ART **9**

1.1. LE TROUBLE DE STRESS POST-TRAUMATIQUE D'HIER A AUJOURD'HUI 9

1.2. LES MODELES EXPLICATIFS DU TSPT 12

1.2.1. Neurophysiopathologie *12*

1.2.2. Quand le trauma rencontre Bayes *14*

1.3. LE SENS DE PROPRIETE DU CORPS ET DE L'AGENTIVITE 16

1.3.1. Le sens de propriété du corps *16*

1.3.2. Le sens d'agentivité *19*

1.4. L'ILLUSION DE LA MAIN EN CAOUTCHOUC 22

1.5. LE TSPT SOUS-TYPE DISSOCIATIF 26

1.6. L'IMMOBILITE TONIQUE 27

1.7. LA STIMULATION ELECTRIQUE TRANSCRANIENNE A COURANT CONTINU (TDCS) 29

1.8. HYPOTHESES ET OBJECTIFS 32

PARTIE 2 : VERS UN MODÈLE DIMENSIONNEL [ARTICLE] **47**

PARTIE 3 : APPROCHE EXPÉRIMENTALE [ARTICLE] **81**

PARTIE 4 : L'ÉCHELLE D'IMMOBILITÉ TONIQUE [ARTICLE] **112**

PARTIE 5 : DISCUSSION GÉNÉRALE **133**

5.1. PERSPECTIVES DE RECHERCHE 135

5.2. RETOMBEES CLINIQUES ET THERAPEUTIQUES 136

CONCLUSION GÉNÉRALE **139**

Remerciements

Au terme de ce long voyage qu'a été la réalisation de ma thèse, je voudrais prendre un moment pour exprimer ma gratitude à toutes celles et ceux qui, d'une manière ou d'une autre, m'ont accompagné et soutenu.

Je remercie tout d'abord ma directrice de thèse, le Pr Anne SAUVAGET, pour sa confiance, son écoute et sa patience. Ses conseils avisés et son regard scientifique exigeant m'ont guidé tout au long de ce parcours. Au-delà d'avoir été une formidable directrice de thèse, c'est un mentor qui m'a accompagné dans tout mon parcours professionnel, une égide qui m'a offert l'espace et la protection nécessaire à mon développement. Je remercie également les Pr Samuel BULTEAU et Thibault DESCHAMPS pour leurs précieux éclairages, leurs accompagnement, leur disponibilité et leur bienveillance. Que de discussions passionnantes qui ont été le terreau de mes travaux scientifiques.

Je suis profondément reconnaissant aux rapporteurs et aux membres du jury qui ont accepté de juger ce travail et d'enrichir ma réflexion de leurs remarques et suggestions.

Je remercie tout particulièrement mes rapporteurs, Pr Philippe FOSSATI et Pr Eric FAKRA, pour avoir accepté cette responsabilité exigeante et pour l'attention qu'ils accorderont à la lecture de ce manuscrit. Leur expertise et leur regard critique constitueront un apport précieux pour enrichir ma réflexion. Les échanges stimulants lors des journées des jeunes scientifiques de l'AFPBN m'ont marqué et vont rester dans ma mémoire.

Je suis également très reconnaissant au Pr Caroline DUBERTRET, Pr Mohamad EL HAJ et Dr Mélanie VOYER d'avoir accepté de siéger dans ce jury. Leur présence est pour moi un grand honneur, et je me réjouis des échanges scientifiques et humains qui auront lieu lors de la soutenance. Au-delà de l'évaluation, je considère leur participation comme une marque de confiance et d'intérêt pour les travaux présentés dans cette thèse, et je leur en suis profondément reconnaissant. Une mention spéciale au Pr Caroline DUBERTRET qui m'a encadré avec rigueur et bienveillance lors de mon Master 2 dans son service, qui m'a fait découvrir l'illusion de la main en caoutchouc, un sujet passionnant qui a été la racine que ce travail de thèse, milles merci à vous.

Je remercie également les membres de mon comité de suivi individuel, Pr Wissam EL HAGE et Pr Abdel Halim BOUDOUKHA, pour leur accompagnement bienveillant, leur temps, leurs conseils avisés et l'intérêt qu'ils ont porté tout au long de l'évolution de ce travail.

À toutes et tous, au-delà de votre expertise précieuse sur les sujets abordés dans cette thèse, vous avez toutes et tous été des soutiens ou des modèles sources d'inspiration et de motivation dans mon parcours professionnel et de recherche, encore merci à vous, merci de ce que vous représentez.

Ma gratitude va aussi aux patients et participants de cette recherche : sans leur confiance et leur implication, ce travail n'aurait pas pu voir le jour.

Je n'oublie pas mes collègues, mes enseignants, pour les discussions passionnantes, les coups de main improvisés, et les moments de légèreté partagés qui ont rendu ces années de recherche et de travail bien plus agréables. Vous constituez chacun un maillon précieux dans mon parcours qui m'a permis d'en arriver là où j'en suis aujourd'hui.

Enfin, je tiens à remercier ma famille et mes amis, qui m'ont soutenu sans relâche, dans les périodes de doute comme dans les réussites. Leur patience, leur amour et leur confiance m'ont donné la force d'avancer jusqu'au bout.

À toutes et à tous, je dédie cette thèse, avec émotion, gratitude et sincérité.

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

PARTIE 1 : ÉTAT DE L'ART

Figure 1 : Neurophysiopathologie du trouble de stress post-traumatique (p.13)

Figure 2 : Le triangle d'éclosion du trouble de stress post-traumatique selon le modèle bayésien (p.16)

Figure 3 : Les modèles neurocognitifs du sens d'agentivité (SoA) (p.21)

Tableau 1 : Le sens d'agentivité (SoA) et le sens de propriété du corps (SBO) (p.22)

Figure 4 : L'illusion de la main en caoutchouc (p.23)

Figure 5 : Illustration de l'illusion de la main en caoutchouc dynamique avec la double dissociation entre le sens de propriété du corps et d'agentivité (p.24)

Figure 6 : Auto-questionnaire de l'illusion de la main en caoutchouc dynamique (p.25)

Figure 7 : Neurobiologie du trouble de stress post-traumatique (TSPT) et de son sous-type dissociatif (TSPT-DS) (p.26)

Figure 8 : La cascade de défense (p.28)

Tableau 2 : Les alphas de Cronbach des études de validation de l'échelle d'immobilité tonique (p.29)

Tableau 3 : Les études randomisées contrôlées évaluant les effets de la tDCS dans le TSPT (p.31)

PARTIE 2 : VERS UN MODÈLE DIMENSIONNEL

Figure 1 : Altérations des réseaux cérébraux dans le trouble de stress post-traumatique (p.53)

Figure 2 : La théorie prédictive appliquée au TSPT (p.55)

Figure 3 : Le modèle comparateur dans le contrôle de l'action (p.59)

Figure 4 : The rubber hand illusion (p.62)

Figure 5 : Modèle dimensionnel des troubles de la conscience du corps dans le trouble de stress post-traumatique et son sous-type dissociatif (p.66)

PARTIE 3 : APPROCHE EXPÉRIMENTALE

Figure 1 : Flow-chart (p.87)

Figure 2 : L'illusion de la main en caoutchouc dynamique (p.88)

Figure 3 : Illustration de (A) l'illusion de la main en caoutchouc dynamique et des 3 conditions réalisées dans notre étude à savoir la condition (B) active synchrone, (C) active asynchrone, (D) passive synchrone. Le triangle indique la présence d'un biais temporel défini par un décalage entre le mouvement des deux index. Extrait et adapté de Laurin et al. 2021 (p.89)

Tableau 1 : Questionnaire en 16 items de l'illusion de la main en caoutchouc dynamique (extrait et traduit de Kalckert & Ehrsson, 2012) (p.90)

Figure 4 : Modélisation de la diffusion du courant tDCS à 2 mA avec l'anode sur le cortex préfrontal dorsolatéral gauche (F3 selon le système EEG 10/20) et la cathode sur la région supraorbitaire droite (Fp2 selon le système EEG 10/20). Logiciel Neuroelectric v2.0.11.8. (p.91)

Tableau 2 : Caractéristiques sociodémographiques et cliniques des patients souffrant d'un trouble de stress post-traumatique (p.93)

Figure 5 : Résultats des scores de l'illusion de la main en caoutchouc dynamique (p.95)

Tableau 3 : Analyse item par item des questions contrôles du sens d'agentivité en condition active asynchrone et passive synchrone (p.96)

Tableau 4 : Les effets de la tDCS on-line sur les performances de la RHI dynamique (p.97)

Tableau 5 : Liste des effets indésirables mineurs de la tDCS rapportés par les participants (p.98)

PARTIE 4 : L'ÉCHELLE D'IMMOBILITÉ TONIQUE

Tableau 1 : Avantages et limites de la FR-TIS (p.120)

Figure 1 : Organigramme concernant la sélection des patients inclus pour l'analyse des propriétés psychométriques de la FR-TIS (p.121)

Tableau 2 : Caractéristiques sociodémographiques et cliniques des patients inclus dans l'analyse de la validité psychométrique de la FR-TIS (N = 120) (p.122)

Tableau 3 : Validité psychométrique de la FR-TIS avec une analyse unidimensionnelle, puis tridimensionnelle et enfin tridimensionnelle modifiée dans laquelle les items 3 et 6 pour la sensation de tremblement et de froid, respectivement, ont été exclus (p.123)

Figure 2 : La version française validée de l'échelle d'immobilité tonique (p.126)

LISTE DES ABRÉVITATIONS

CAPS-5 : Clinician Administered PTSD Scale for DSM-5

CEN : Central Executive Network / Réseau de contrôle exécutif

CFI : Comparative Fit Index (Indice comparatif d'adéquation)

CPP : Comité de Protection des Personnes

CTQ : Childhood Trauma Questionnaire

DES-2 : Dissociative Experience Scale – Revised

dlPFC : dorsolateral Prefrontal Cortex / Cortex préfrontal dorsolatéral

DMN : Default Mode Network / Réseau du mode par défaut

DSM-5 : Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders, 5e édition

DS : Dissociative Subtype (sous-type dissociatif du TSPT)

ET : Événements Traumatiques

FR-TIS : French version of the Tonic Immobility Scale

IC : Intervalle de Confiance

IT : Items 1 à 6 de la FR-TIS (immobilité tonique)

NMDA-r : récepteurs N-Méthyl-D-Aspartate

P : trauma-related Prior

PCL-5 : PTSD Checklist for DSM-5

PFCm : Cortex préfrontal médian

PTSD : Post-Traumatic Stress Disorder

rACC : rostral Anterior Cingulate Cortex / Cortex cingulaire antérieur rostral

RHI : Rubber Hand Illusion

RMSEA : Root Mean Square Error of Approximation

SBO : Sense of Body Ownership

SN : Salience Network / Réseau de saillance

SoA : Sense of Agency

SPSS : Statistical Package for the Social Sciences (logiciel IBM® SPSS® Statistics)

TIS : Tonic Immobility Scale

tDCS : transcranial Direct Current Stimulation

TRE : Tension and Releasing Exercice

TSPT : Trouble de Stress Post-Traumatique

« *Il faut dire que je la sens vraiment, cette partie de moi qui n'en fait pas vraiment partie. C'est une sensation intime, permanente, étrange et même étrangère.* »

Judikael Hirel

Concorde Rouge, 2023

PARTIE 1 :
ÉTAT DE L'ART

1. Partie 1 : État de l'art

Dans cette épitaphe, l'auteur J. Hirel partage un sentiment bien singulier qu'il ressent après un traumatisme grave lié à une agression physique, un sentiment d'étrangeté. Une étrangeté ressentie vis-à-vis de d'une partie de son propre corps, une étrangeté qui peut également affecter les mouvements volontaires des personnes qui souffrent d'une pathologie liée aux psychotraumatismes. Dans ce travail de thèse, nous nous attacherons à explorer et mieux comprendre les mécanismes neurocognitifs qui sous-tendent ce sentiment d'étrangeté ressentie vis-à-vis de soi-même, un sentiment bien particulier qui est le témoin d'un dévoiement des processus de la conscience corporelle. Dans un premier temps, nous allons présenter les principaux concepts théoriques qui ont nourri nos réflexions pour ce travail de thèse.

1.1. Le trouble de stress post-traumatique d'hier à aujourd'hui

Les guerres, les rixes, les viols, l'inceste, ou bien encore les violences intrafamiliales pour ne citer qu'eux, jalonnent depuis toujours l'Histoire de l'humanité. Les affres issues de l'horreur de ces évènements sont décrites depuis l'Antiquité, comme en témoignent les récits d'Hérodote qui narrent la cécité brutale qui a frappé l'athénien Épizelos en pleine bataille (Livre VI, CXII). Malgré les descriptions successives des « *vents de boulet* » de Desgenettes (XVIII^{éme} siècle), des « *soldiers' heart* » de Mendes Da Costa (XIX^{ème} siècle), de la « *névrose traumatique* » d'Oppenheim avec les « *railway spine* » (XIX^{ème} siècle), ou bien encore le « *shell shock* » et la « *névrose de guerre* » de la Première (1914-1918) et Seconde Guerre Mondiale (1939-1945), ce n'est qu'après la guerre du Vietnam (1955-1975) que la névrose post-traumatique a véritablement attiré l'attention de l'opinion publique et du monde médical, notamment aux États-Unis en raison des ravages du « *post-Vietnam syndrom* » qui affectait les vétérans de retour chez eux (Mengin, 2023). C'est dans ce contexte que l'état de stress post-traumatique (ESPT) fut officiellement reconnu en 1980 au sein du *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders, Third Edition* (DSM-III) (APA, 1980). Au fur et à mesure des décennies, les critères diagnostics de l'ESPT, tout comme la définition du psychotraumatisme, n'ont cessées d'évoluer pour devenir le trouble de stress post-traumatique (TSPT) tel que nous le connaissons aujourd'hui.

Dans sa dernière version, le *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders, Fifth Edition* (DSM-5) définit les évènements psychotraumatiques comme toute « *exposition à la mort effective ou à une menace de mort, à une blessure grave ou à des violences sexuelles* » (APA, 2013). Des imminents psychiatres de la psycho-traumatologie françaises précisent qu'il s'agit bien « *d'évènements agressants ou menaçants pour la vie ou pour l'intégrité* » (Crocq, 1999) qui mènent à une « *confrontation au réel de la mort* » (Lebigot, 2000) le plus souvent dans une « *expérience de solitude absolue, en rupture de tous liens communautaires et culturelles* » (Barrois, 1998). Selon le DSM-5, le TSPT émerge à la suite d'un ou plusieurs évènements traumatiques et se caractérise par la présence persistance ($\geq$ 4 semaines) et invalidante de quatre clusters de symptômes que sont :

- Les symptômes de répétition ou reviviscences : souvenirs intrusifs, cauchemars, flashbacks (ecmnésies), réactions de peur liées à l'événement traumatique ;
- Les comportements d'évitement : évitement des stimuli liés au traumatisme ;
- Les altérations négatives des cognitions et de l'humeur : amnésie, pensées négatives sur soi-même ou sur le monde, reproche à soi-même ou aux autres d'avoir causé le traumatisme, affect négatif, diminution de l'intérêt, sentiment d'isolement, difficulté à éprouver un affect positif ;
- Les signes d'hyperéveil : troubles du sommeil et de l'attention, hypervigilance, réactions de sursaut, agressivité, irritabilité, comportements autodestructeurs.

Dans la Classification Internationale des Maladies, 11ème Édition (CIM-11) (WHO, 2022), le TSPT se développe après l'exposition à un ou à une série d'événements psychotraumatiques qualifiés comme des expériences « *extrêmement menaçantes ou horribles* ». Proche des critères diagnostics du DSM-5, la CIM-11 caractérise le TSPT par la présence sur plusieurs semaines des symptômes suivants :

- Les reviviscences avec des souvenirs intrusifs, des flashbacks ou des cauchemars. La reviviscence peut se faire par le biais d'une ou de plusieurs modalités sensorielles et s'accompagne généralement d'émotions fortes ou accablantes, en particulier la peur ou l'horreur, et de sensations physiques fortes ;
- L'évitement des pensées, activités, situations ou personnes en lien avec le souvenir de l'événement ;
- La perception persistante d'une menace actuelle accrue comme peut en témoigner une hypervigilance ou une réaction de sursaut aux bruits inattendus.

On estime que 21% à 90% des personnes ont été exposées à au moins une fois dans leur vie à un événement considéré comme psychotraumatique (Boudoukha, 2020). Cependant, la prévalence sur la vie entière du TSPT est bien moindre. Elle est estimée à 1.9% en Europe (0.9% chez les hommes et 2.9% chez les femmes), 3.9% en France (1.5% chez les hommes et 6% chez les femmes) (Alonso et al., 2004), 4% à 6% dans le monde (Koenen et al., 2017). Cette prévalence peut monter jusqu'à 30% à 50% dans certains groupes à risque très exposés aux psychotraumatismes comme les sapeurs-pompiers, les policiers ou les militaires (Berger et al., 2012; Obuobi-Donkor et al., 2022). Ces chiffres nous indiquent qu'il n'y a pas de causalité directe entre l'exposition à un trauma et l'éclosion ultérieure d'un TSPT. En effet, le TSPT est généralement conceptualisé comme un état pathologique résultant d'une rencontre complexe et singulière entre un individu, qui a des facteurs de vulnérabilité et de résilience qui lui sont propres, avec un évènement perçu comme traumatique dans une approche subjective du trauma (Borenstein, 2016; Creamer et al., 2005). Ces deux éléments sont au cœur du modèle diathèse-stress qui est un cadre théorique selon lequel les résultats en matière de santé mentale sont le fruit d'interactions entre des vulnérabilités antérieures (diathèses) et des facteurs de stress environnementaux tels que les psychotraumatismes (Abela & D'Alessandro, 2002; Elwood et al., 2009). Autrement dit, toutes les personnes exposées à un évènement vécu comme traumatique ne développeront pas un TSPT. Il semble donc plus pertinent de parler

d'évènement traumatogène, c'est-à-dire avec un potentiel traumatique, qui aura des conséquences pathologiques selon deux paramètres essentiels que sont :

- Les forces et faiblesses des individus qui sont principalement héritées de leur histoire personnelle et familiale, tout en considérant les facteurs de vulnérabilité (épi)génétique liés au TSPT (Lukas et al., 2024), et sans oublier d'autres facteurs de risque démographiques que sont le sexe féminin et le jeune âge des individus exposés (Chang et al., 2017; Kessler et al., 1995) ;
- L'évènement traumatique en lui-même selon la nature du trauma (avec la notion de surrisque traumatique dans les violences interpersonnelles et sexuelles (Lopez et al., 1992)), le type d'exposition (directe, témoin, par annonce) (APA, 2013), la durée et le nombre d'expositions traumatiques ≥ 4 (trauma simple versus trauma complexe) (Karam et al., 2014; WHO, 2022), ainsi que l'âge d'exposition (les traumas précoces pouvant impacter le développement psychique de l'enfant avec des conséquences psychologiques et physiques jusqu'à l'âge adulte) (Daníelsdóttir et al., 2024; Fernandez et al., 2024).

Une fois constitué, le TSPT peut rapidement se compliquer de comorbidités, qu'elles soient psychiques ou physiques. Loin d'être anecdotique, on estime que 80% des TSPT sont associés à au moins une comorbidité psychiatrique (Kessler et al., 1995; Ruiz & Kurkdjian, 2007) à commencer par la dépression qui affecte 30% à 50% des patients souffrant d'un TSPT (Angelakis & Nixon, 2015; Müller et al., 2014). Les autres comorbidités psychiques du TSPT comprennent entre autre les troubles anxieux, les idées et comportements suicidaires ou bien encore les troubles liés à l'utilisation de substances (Kessler et al., 1995; Müller et al., 2014). Concernant la population civile, une récente et vaste étude Suédoise a démontré que les complications psychiatriques apparaissaient principalement dans l'année qui suit un évènement traumatique, et ce de manière indépendante des facteurs familiaux (Chen et al., 2024). Outre la dimension psychologique, la place du corps a toujours été très importante dans le TSPT. C'est ainsi que les complications physiques sont très fréquentes dans le TSPT avec plus de 80% de syndromes douloureux (Kessler et al., 2012). La fibromyalgie, les pathologies liées au stress telles que la cardiomyopathie de Takotsubo, le diabète, le syndrome métabolique, les maladies gastro-intestinales, la dysthyroïdie, les maladies auto-immunes, ou encore les inconforts sexuels sont également très couramment associés au TSPT (Pivac et al., 2023; Yehuda et al., 2015).

Au vu de ces éléments, on comprend l'importance de traiter rapidement et efficacement les patients souffrant d'un TSPT. La prise en charge optimale nécessite de connaître les principales théories explicatives du TSPT. Ces théories se sont récemment enrichies d'un nouveau modèle des neurosciences computationnelles, un modèle Bayésien qu'il convient de présenter.

1.2. Les modèles explicatifs du TSPT

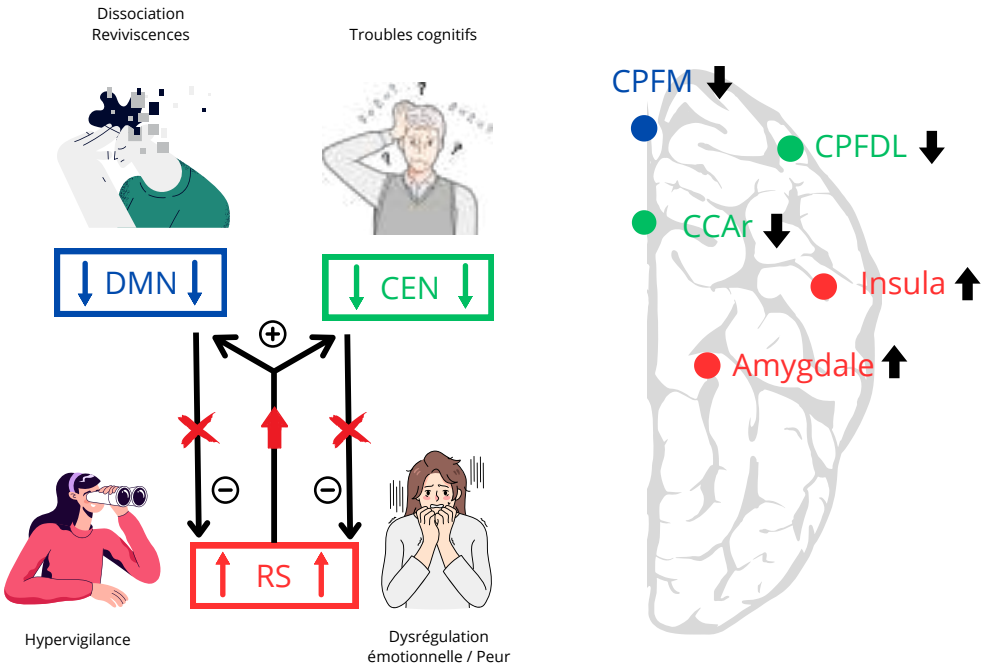
1.2.1. Neurophysiopathologie

Depuis plus d'un demi-siècle, les neurosciences ont beaucoup œuvré afin de mieux comprendre les mécanismes qui sous-tendent le TSPT. Ces connaissances sont indispensables pour envisager des traitements efficaces et personnalisés.

Selon la théorie du déficit de la régulation émotionnelle, le traitement d'une menace implique plusieurs régions cérébrales, tout particulièrement l'amygdale, le cortex préfrontal médian (CPFm), le cortex préfrontal dorsolatéral (CPFdl), l'hippocampe, l'insula antérieure et le cortex cingulaire antérieur rostral (CCAr) (Dunsmoor et al., 2019; Milad et al., 2007; Phelps et al., 2004). Ces différentes structures sont réparties dans trois réseaux cérébraux différents que sont (i) le réseau de saillance qui est à l'interface des autres réseaux, il est impliqué dans la détection des signaux externes et internes pertinents, dits « *saillant* », afin d'y allouer les ressources attentionnelles nécessaires, et c'est un réseau qui inclue notamment l'amygdale et l'insula antérieure ; (ii) le réseau du mode par défaut (*Default Mode Network*, DMN) qui est impliqué dans les ruminations, le vagabondage mental, les processus de référence à soi et se compose entre autre du CPFm ; (iii) et pour finir le réseau du contrôle exécutif (*Control Executive Network*, CEN) qui est impliqué dans les fonctions exécutives et cognitives incluant le CCAr et le CPFdl (Faucher et al., 2021). Dans le TSPT, la forte intensité du danger induit une hyperactivation des régions limbiques, en particulier l'amygdale, une hyperactivité émotionnelle qui persiste une fois la menace évincée du fait d'un manque de régulation « *top-down* » du cortex préfrontal, soit un déficit de régulation aboutissant à un défaut d'extinction de la peur qui est également sous-tendu par un défaut d'inhibition de l'hippocampe sur l'amygdale empêchant la contextualisation du souvenir traumatique (Nicholson, McKinnon, et al., 2020). Ce type de TSPT caractérisé par une hypomodulation émotionnelle s'explique aussi par des anomalies de la connectivité entre les réseaux cérébraux incluant : une hypoconnectivité entre le DMN ventral et dorsal pouvant entraîner une altération des processus de la référence à soi, de la cognition et de la régulation des émotions ; une hypoconnectivité entre DMN et le réseau de saillance pouvant conduire à des symptômes de reviviscence et des troubles de la conscience de soi ; une hypoconnectivité entre CPF et le réseau de saillance pouvant conduire à des troubles cognitifs (Bao et al., 2021; Ross & Cisler, 2020) (Figure 1). Récemment, une méga-analyse a montré une réduction du volume du cervelet significativement plus importante chez les personnes souffrant d'un TSPT que chez les sujets sains, et c'est dans ce contexte que le cervelet est en train de devenir une structure cérébrale d'un grand intérêt dans le TSPT (Huggins et al., 2024). Avec la dysrégulation de l'axe corticotrope et des processus inflammatoires, il faut noter que les capacités de neuroplasticité du cerveau dans le TSPT sont réduites et que cette situation qui ne fera que s'aggraver au cours du temps, plaçant ainsi le malade dans un cercle vicieux (Pivac et al., 2023).

Voici une synthèse des connaissances neurophysiopathologiques du TSPT qui évoluent au fil du temps. Les théories neurobiologiques sont à compléter avec les théories cognitives (Ehlers & Clark, 2000) et les théories du conditionnement (Mahan & Ressler, 2012) pour saisir le TSPT dans son ensemble. Inspiré des théories du conditionnement classique de Pavlov et du conditionnement opérant de Skinner (Rehman et al., 2025; Skinner, 1971), le conditionnement dans le TSPT est une procédure d'apprentissage qui permet à un stimulus initialement inoffensif d'être perçu de manière durable comme un stimulus aversif. Le conditionnement est favorisé par l'évitement des indices contextuels ou symboliques qui rappelle le traumatisme, un évitement qui se retrouve alors comme récompensé par une baisse relative de la détresse validant ainsi la perception de danger associée aux stimuli évités. Au-delà de ces différentes approches bien connues, un modèle intégratif plus récent a émergé en conceptualisant le TSPT à travers le prisme du cerveau bayésien, et c'est ce dernier modèle du TSPT que nous allons aborder dans la partie suivante.

Figure 1 : Neurophysiopathologie du trouble de stress post-traumatique



Le réseau de saillance (RS) est indiqué en rouge, il inclue notamment l'amygdale et l'insula antérieure, ces deux structures ont une forte activité et connectivité dans le TSPT. À l'inverse, le réseau du mode par défaut (DMN) (en bleu) et le réseau du contrôle exécutif (CEN) (en vert) ont une activité et une connectivité réduites. En conséquence, la régulation « top-down » du cortex préfrontal sur le RS est limitée ce qui engendre une dysrégulation des émotions, un défaut d'extinction de la peur et une hypervigilance concernant de potentiels dangers internes et externes. Inversement, si le RS module l'activité des autres réseaux, cela peut donner des troubles cognitifs pour le CEN, de la dissociation et des reviviscences pour le DMN. Abréviations : CCAr : Cortex Cingulaire Antérieur rostral, CEN : Central Executive Network, CPFDL : Cortex Préfrontal Dorsolatéral, CPFM : Cortex Préfrontal Médian, DMN : Default Mode Network.

1.2.2. Quand le trauma rencontre Bayes

Le cerveau bayésien (Montague et al., 2012; Stephan & Mathys, 2014), en tant que modèle prédictif, postule que notre cerveau déduit à partir des entrées sensorielles un modèle interne du monde extérieur. À son tour, ce modèle interne peut être utilisé pour créer des prédictions sur les entrées sensorielles. Les prédictions sont optimales en fonction (Montague et al., 2012; Stephan & Mathys, 2014) :

- Des croyances accumulées à partir d'expériences passées ;
- La connaissance de la probabilité d'une hypothèse par rapport à une autre ;
- Les règles de Bayes qui mesurent le degré de fiabilité, ou de certitude, et non la fréquence relative d'une croyance ou expérience.

Ce modèle implique que le cerveau génère constamment des anticipations sensorielles à partir des croyances existantes afin de produire un message d'erreur lorsque les prédictions ne sont pas respectées (« *erreur de prédiction* »), c'est-à-dire lorsqu'il n'y a pas de correspondance entre la prédiction issue des croyances antérieures et les informations sensorielles entrantes (Barrett & Simmons, 2015; Kanai et al., 2015; Köster et al., 2020; Paulus et al., 2019). En d'autres termes, le cerveau n'est pas un dispositif passif d'entrées sensorielles, mais un système actif capable de générer des prédictions, d'utiliser des données passées pour prédire le présent, de vérifier leur validité et de corriger les erreurs de prédiction à la base des processus d'apprentissage. La correction des erreurs de prédiction entraînera donc la modification du système de croyances afin de mettre à jour de manière dynamique les prédictions ultérieures afin de ne plus refaire cette même erreur de prédiction. Cependant, toutes les erreurs de prédiction ne sont pas responsables de la mise à jour des croyances. La probabilité qu'une nouvelle information sensorielle mette à jour les prédictions dépend de leur précision, c'est-à-dire que l'ajustement du modèle interne aux erreurs de prédiction dépend de la certitude de l'information sensorielle par rapport à la certitude des croyances (Barrett & Simmons, 2015; Kanai et al., 2015; Köster et al., 2020; Paulus et al., 2019). En d'autres termes, si nous avons des croyances avec un niveau élevé de certitude et de précision, la croyance précédente sera insensible à une mise à jour d'une information sensorielle qui aurait un niveau de précision inférieur.

Il est également important de comprendre que la prédiction est indissociable de la perception. En effet, selon la théorie de l'inférence bayésienne, la prédiction probabiliste préalable (« *prior* ») est combinée à la probabilité de la nouvelle information sensorielle (« *likelihood* ») pour former une perception *a posteriori* (« *prior* » x « *likelihood »)* (Knill & Pouget, 2004). En d'autres termes, la perception est la conséquence d'une interaction entre le modèle prédictif et les entrées sensorielles. Par conséquent, nous ne percevons pas le monde tel qu'il est dans l'absolu, mais tel que le cerveau a appris à le percevoir en fonction de nos croyances et expériences passées.

Sur la base de ces connaissances, le TSPT a été reconceptualisé à travers le modèle prédictif (Kube et al., 2020). En raison de sa nature menaçante, l'événement

traumatique peut être considéré comme un événement d'une grande précision, mais cette précision est relative et toujours modulée par la perception qu'a l'individu du trauma selon ses croyances et expériences antérieures (Kube & Rozenkrantz, 2021). Les patients avec TSPT ont vu leurs croyances être mises à jour par le trauma car il n'y avait pas de croyances antérieures dont le degré de précision était supérieur à celui du traumatisme. Une fois ces croyances intégrées, le système de croyances contient des croyances négatives hyperprécises liées au traumatisme. Par conséquent, les nouvelles entrées sensorielles peuvent réactiver l'hypothèse perceptive encodée au moment du trauma même si elle ne correspond pas à l'entrée sensorielle actuelle. Quant aux croyances liées au trauma, elles altèrent négativement les perceptions du monde interne et externe qui sont dès lors perçues à travers le prisme de l'expérience traumatique.

Ainsi, les symptômes de reviviscence du TSPT seraient la conséquence d'une réactivation des croyances hyper-précises du trauma qui viennent moduler les entrées sensorielles. Dans la situation où les croyances négatives modifiées (antérieures) submergent les entrées sensorielles (similitude), la perception négative de l'environnement incorpore des souvenirs du traumatisme sous forme de flashbacks ou de symptômes de répétition. La réactivation des croyances liées au trauma peut provenir (Kube et al., 2020) :

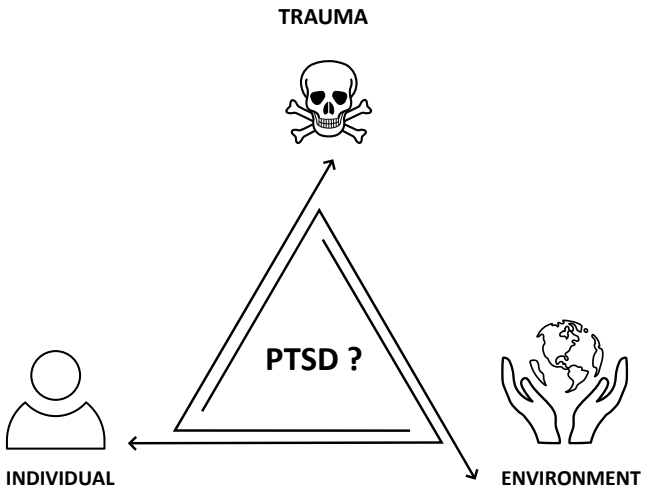
- Des indices de l'environnement rappelant directement le trauma ;
- De la perception négative de l'environnement qui a été altérée par les croyances négatives liées au trauma, ces dernières incorporent des informations perceptives du trauma qui vont à leur tour réactiver les croyances liées au trauma formant ainsi des cycles de réactivation ;
- Des inférences intéroceptives où les informations corporelles internes vont réactiver le trauma tout en sachant que l'intéroception est modulée par les émotions et les perceptions du monde extérieur.

En raison de son caractère hyperprécis, les croyances liées au trauma ont peu de chances d'être actualisées par d'autres expériences ultérieures moins précises de la vie quotidienne. On peut donc comprendre que les comportements d'évitement sont à l'origine d'un double problème car ils participent au processus de conditionnement et ils réduisent la probabilité de faire des expériences nouvelles qui pourraient invalider les croyances liées au traumatisme et permettre ainsi leur mise à jour.

Nous comprenons ainsi que le modèle bayésien conçoit le TSPT comme un trouble mental caractérisé par une altération du système de prédiction-perception qui apparaît après une rencontre singulière entre (Figure 2) :

- Un événement traumatique qui a une précision relative en fonction de la perception de chaque individu ;
- Un individu défini par une histoire et des expériences spécifiques qui modulent la perception du monde interne et externe ainsi que la perception des expériences qui s'y produisent ;
- Un environnement qui peut infirmer ou confirmer les croyances liées au trauma à travers des nouvelles expériences respectivement négatives ou positives.

Figure 2 : Le triangle d'éclosion du trouble de stress post-traumatique selon le modèle Bayésien



Le trouble de stress post-traumatique résulte de la rencontre singulière entre un événement potentiellement traumatique qui a une précision relative selon la perception qu'en a l'individu, perception influencée par son histoire et ses expériences passés, dans un environnement pouvant confirmer ou infirmer les croyances liées au trauma à travers des nouvelles expériences.

C'est ainsi que le modèle Bayésien se présente comme un modèle intégratif qui rend compte de toute la complexité et subjectivité de l'expérience traumatique ainsi que de ses conséquences. Ce modèle conceptualise le TSPT comme étant un état pathologique résultant d'une altération du système de prédiction-perception après un trauma, ce dernier étant à l'origine de croyances négatives très fiables et peu sensibles aux mises à jour perceptuelles, un système de prédiction-perception altéré dont dépend certaines fonctions cognitives comme le sens de propriété du corps et le sens d'agentivité qui sont les deux composantes principales de la conscience corporelle. **Admettre le modèle d'altération du système de prédiction-perception dans le TSPT, c'est admettre de potentielles conséquences sur les fonctions cognitives qui dépendent de ce système de prédiction-perception, comme c'est le cas du sens de propriété du corps et du sens d'agentivité**, des conséquences qu'il convient alors de mieux étudier et comprendre à travers nos travaux de thèse.

1.3. Le sens de propriété du corps et de l'agentivité

1.3.1. Le sens de propriété du corps

Imaginez-vous assis devant une table, les mains posées à plat devant vous et sans aucun mouvement. En regardant vos mains immobiles, vous savez que ce sont les vôtres, qu'elles vous appartiennent, qu'elles font parties de vous contrairement aux autres éléments extérieurs. Ce sentiment de possession d'une partie de soi est appelé le sens de propriété du corps (*Sense of Body Ownership*, SBO) et correspond à la perception subjective qu'un corps, ou qu'une partie du corps, nous appartient faisant

du SBO l'un des processus cognitifs majeurs de la distinction soi-autrui, de la conscience corporelle et donc de l'identité personnelle (Ehrsson, 2020; Gallagher, 2000).

Initialement, le SBO reposait sur des processus d'intégration multisensorielle des informations extéroceptives et intéroceptives, tout particulièrement les informations visuelles, tactiles, proprioceptives et vestibulaires (Braun et al., 2018; Suzuki et al., 2013). Cette intégration multisensorielle avait pour finalité de produire des représentations mentales de soi immédiates, cohérentes et malléables (« *the online representation* »), constituant le mécanisme d'intégration « *bottom-up »* du SBO (Ehrsson, 2020; Litwin, 2020; Tsakiris et al., 2010). Pour que l'intégration sensorielle puisse se réaliser, il est important que les informations sensorielles respectent certaines règles, à savoir (Ehrsson, 2020) :

- Les règles spatiales : respect de la congruence anatomique limitant l'angulation des membres à 20° pour respecter « the *anatomical plausibility »*, et les informations sensorielles doivent également se trouver dans un espace péri-personnel limité en position égocentrée ;
- Les règles temporelles : respect d'un délai < 300 msec entre les stimulations sensorielles et les informations visuelles ;
- La règle de la forme humanoïde : seules les informations sensorielles provenant d'objet respectant l'anatomie humaine peuvent être intégrées ;
- Le respect de ces règles est important et nécessaire pour le SBO. Cependant d'autres facteurs d'influence sont à considérer, en particulier les émotions. En effet, le SBO intègre également les informations intéroceptives qui sont elles-mêmes très liées aux processus émotionnels (Engelen et al., 2023).

Ainsi, le modèle neurocognitif du SBO était quasiment et uniquement basé sur les mécanismes « *bottom-up »*, c'est-à-dire que toute information sensorielle qui respectait les règles de l'intégration sensorielle pouvait participer au SBO. Dans un second temps, les modèles cognitifs ont évolué pour intégrer des étapes de contrôle (« *monitoring »)* dans lesquelles les représentations immédiates sont contrôlées et comparées à des représentations de soi antérieures qui sont plus stables (« *the long-term-body representation* »), définissant ainsi les mécanismes de régulation « *top-down »* du SBO qui ont deux principales fonctions, à savoir : (i) éviter l'introduction dans les représentations mentales d'objets qui ne respectent pas les règles de l'intégration sensorielle, ils sont alors considérés comme du non-soi - (ii) mettre à jour les « *long-term-body representations* » en cas d'erreur de prédiction pertinente provenant des « *online representations* » mettant ainsi en évidence les mécanismes bayésiens qui sous-tendent le SBO (Ehrsson, 2020; Litwin, 2020; Tsakiris et al., 2010). Dernièrement, un modèle multisensoriel probabiliste a été proposé. Contrairement aux modèles antérieurs, ce dernier ne se concentre pas tant sur les règles spatio-temporelles que sur la manière probabiliste dont les signaux sensoriels sont interprétés. En effet, selon la théorie des inférences causales bayésiennes (Körding et al., 2007), la cause la plus probable des signaux sensoriels, notamment entre le « *soi* » et le « *non-soi* », est estimée à partir du respect des règles spatio-temporelles, du niveau d'incertitude sensorielle et des expériences antérieures qui

génèrent les « *prior* » qui sont à la base des prédictions causales (Chancel et al., 2022; Samad et al., 2015). Ce processus d'inférences causales détermine ainsi la décision perceptive automatique de combiner, ou de séparer, les signaux visuels et somato-sensoriels pour former, ou non, une représentation cohérente des parties du corps (O'Kane et al., 2024).

Le SBO mobilise ainsi plusieurs aires cérébrales, notamment :

- L'insula antérieure qui est une aire cérébrale impliquée dans l'intégration des signaux intéroceptifs, proprioceptifs et émotionnels. En effet, l'insula antérieure reçoit les informations sensorielles internes provenant de l'insula postérieure (informations intéroceptives primaires, ex : cœur, viscères etc.) et du cortex pariétal afin de leur donner une valeur émotionnelle subjective, mobilisant les fortes connexions avec le cortex cingulaire antérieur et l'amygdale, ce qui génère l'impression de ressentir un corps vivant et habité, faisant de l'insula antérieure une région essentielle du soi incarné ;
- Le cortex pariétal est l'acteur principal des processus d'intégration sensorielle car il reçoit les afférences corticales des aires sensorielles primaires et secondaires avec des connexion réciproques vers les aires prémotrices et cingulaires. Le lobe pariétal inférieur joue un rôle essentiel dans le contrôle et la comparaison des informations sensorielles avec les prédictions causales, et le cortex pariétal postérieur joue quant à lui un rôle important dans la représentation spatiale du corps. Le lobe pariétal a donc un rôle majeur à jouer pour générer un corps unifié et localisé dans l'espace ;
- Le cortex prémoteur qui est impliqué dans les représentations corporelles en lien avec la planification motrice ;
- L'aire occipitale extra-striée qui est impliquée dans l'intégration des informations visuelles pour élaborer une image du corps dans l'espace.

À noter que le DMN n'intervient pas directement sur le SBO mais va au-delà pour générer une conscience de soi narrative, c'est-à-dire qu'il a pour but de générer une représentation stable de soi à travers le temps et d'ancrer ainsi une identité dans le corps d'un individu (Northoff et al., 2025).

Au niveau expérimental, il existe deux catégories de mesure du SBO (Ehrsson, 2020) :

- Des mesures explicites, dites subjectives, qui interrogent directement le SBO en utilisant des questionnaires évaluant l'expérience de propriété du corps. Il est important de noter que ces mesures sont sensibles à l'influence des biais cognitifs comme les biais de motivation, de performance, de désirabilité ou d'autosatisfaction ;

- Des mesures implicites, dites objectives, qui évaluent indirectement le SBO via d'autres mesures quantifiables qui sont liés à l'expérience de propriété du corps mais dont l'évaluation ne nécessite pas de penser explicitement au SBO, ce qui rend ces mesures moins sensibles aux biais cognitifs. La mesure implicite du SBO est le biais proprioceptif que nous détaillerons ultérieurement avec l'illusion de la main en caoutchouc.

1.3.2. Le sens d'agentivité

Le sens de l'agentivité (*Sense of Agency*, SoA) fait référence à la conscience d'être l'auteur d'une action volontaire, c'est-à-dire avoir un contrôle sur l'action en question et d'anticiper les conséquences de cette action sur son environnement (Braun et al., 2018; Haggard et al., 2002; Haggard, 2017; Moore, 2016). Toute action volontaire a deux composantes que sont un « *agent* » et un « *mouvement* », et le mouvement volontaire a toujours deux caractéristiques à savoir une direction (« *directness* ») et un objectif (« *aboutness* »), le tout réalisé dans un contexte temporel, spatial et émotionnel qui est propre à l'agent, on parle alors d'une action consciente et incarnée (« *embodiement* ») (Bulot et al., 2007; Jardri & Thomas, 2009). Contrairement aux mouvements involontaires qui sont composés uniquement d'une expérience périphérique, il est important de bien comprendre que les mouvements volontaires sont composés à la fois d'une (i) expérience centrale, caractérisée par un état de volition suivi d'une sélection puis d'une préparation de l'action, (ii) et d'une expérience périphérique relayée par l'activation des récepteurs somatosensoriels périphériques lors de la réalisation du mouvement (Haggard, 2017). *Stricto sensu*, le SoA est composé (i) du sentiment d'agentivité - c'est-à-dire un sentiment préréflexif de bas niveau d'être l'auteur d'une action volontaire, de manière automatique et inconsciente, dans une expérience immédiate et donc très lié au système sensorimoteur - (ii) et du jugement d'agentivité - c'est-à-dire un jugement conceptuel réflexif de haut niveau dans lequel nous nous attribuons explicitement une action avec des processus d'attribution causale généraux très liés aux croyances de soi et aux facteurs contextuels (Synofzik et al., 2008). Pour comprendre, en pratique, si vous appuyez sur le bouton « *start* » de la machine à café et qu'immédiatement après le café se prépare, à ce moment précis vous ressentez un sentiment d'agentivité (ex : « *c'est moi qui ai déclenché la préparation du café* ») et c'est un sentiment qui apparaît de manière rapide, automatique, sans réfléchir. Cependant, si un délai apparaît entre la sélection du café et sa production, vous allez commencer à réfléchir consciemment (ex : « *est-ce moi qui a appuyé ?* », « *ai-je bien appuyé ?* ») et vous entrez ainsi dans le jugement d'agentivité qui nécessite d'évaluer et de réfléchir à la situation. Dans la suite de ce travail, le SoA fera uniquement référence au sentiment d'agentivité préréflexif qui est le sujet de nos recherches.

À ce jour, plusieurs modèles neurocognitifs expliquent le SoA :

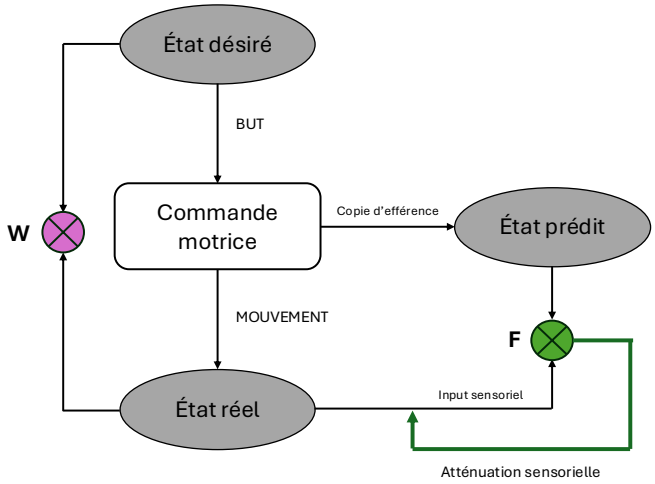
- La théorie de la prédiction motrice (Ford & Mathalon, 2019; Frith, 2012; Frith et al., 2000) (Figure 3): C'est la théorie la plus influente du SoA qui est basée sur un modèle comparateur. Ce modèle computationnel est basé sur le système du contrôle moteur dans lequel chaque action volontaire commence par une intention, ou une volition, ce qui déclenche une sélection de l'action au niveau du cortex préfrontal (Rowe et al., 2010). Ensuite, l'action sélectionnée se prépare et, sur la base de l'apprentissage par l'expérience (« *modèle inverse* »), le système moteur va produire des copies d'efférence, c'est-à-dire des prédictions sensorielles qu'aura l'action lors de sa réalisation. La prédiction de l'action implique l'aire motrice supplémentaire (SMA) (Fried et al., 2011; Rowe et al., 2010). Lors de la réalisation du mouvement volontaire, les copies efférentes sont comparées aux retours sensoriels de l'action effectuée (Frith, 2012) et ce processus de comparaison implique principalement le gyrus angulaire, le

lobe pariétal inférieur et le gyrus temporal supérieur (Zito et al., 2020). On comprend ainsi que le SoA est générée lorsque les prédictions sensorimotrices, issues des copies d'efférence, correspondent aux retours sensoriels de l'action réalisée, sans erreur de prédiction. L'émergence du SoA s'accompagne alors d'un processus d'atténuation sensorielle qui réduit l'intensité des informations sensorimotrices prédit contrairement aux stimuli externes (Kilteni & Ehrsson, 2017), ces derniers sont alors plus saillants pour mobiliser les ressources attentionnelles nécessaire à leurs analyses, et c'est bien cette atténuation sensorielle qui expliquerait pourquoi nous ne pouvons pas nous chatouiller nous-mêmes car nous atténuons nos propres stimuli sensoriels (Frith et al., 2000). Ainsi, le SoA participe à son niveau à la distinction soi-autrui : les informations sensorimotrices atténuées sont des informations correctement prédites et donc associées à soi. Inversement, les informations sensorimotrices non atténuées présentent une erreur de prédiction et sont donc considérées comme n'étant pas de soi. Plusieurs études ont également souligné l'importance du cervelet qui interviendrait dans l'ajustement des prédictions sensorimotrices (Kilteni & Ehrsson, 2024; Welniarz et al., 2021). On voit dès lors que le SoA mobilise des aires cérébrales impliquées dans la physiopathologique du TSPT (cortex préfrontal, cervelet) nous invitant à mieux étudier et comprendre la manière dont le SoA peut être affecté dans ce trouble ;

- La théorie de la causalité mentale apparente (Wegner, 2017; Wegner & Wheatley, 1999) (Figure 3): Dans ce modèle très différent, le SoA est issu d'un processus rétrospectif associant une intention préalable (ex : « *je veux allumer la cafetière* »), un lien temporel étroit (ex : « *la cafetière s'allume juste après avoir appuyé sur le bouton d'allumage »*), une relation causale attendue (ex : « *je sais que c'est moi qui a allumé la cafetière* »), et sans aucune interférente externe apparente (ex : « *pas d'autre cause visible qui aurait provoqué cette action* »). Autrement dit, si notre intention d'agir se produit avant que nous n'agissions, qu'elle est cohérente avec l'action et qu'elle est la seule cause plausible de l'action, alors nous aurons automatiquement l'impression d'avoir causé l'action. Il s'agit donc d'un modèle de reconstruction cognitive basé sur des voies causales inconscientes qui minimise le rôle du contrôle moteur dans le SoA ;

- La théorie d'intégration des indices du sens de l'action (Moore, 2016; Moore & Fletcher, 2012): Pendant longtemps, les théories de la prédiction motrice de Frith et celles de la reconstruction cognitive de Wegner se sont opposées, s'excluant l'une l'autre. Des données récentes ont prouvé qu'il n'en était rien, permettant d'évoluer progressivement vers un modèle intégratif où les deux points de vue sont valables. Selon la théorie d'intégration des indices du sens de l'action, les deux modèles précédemment mentionnés peuvent participer au SoA selon deux éléments que sont : (i) l'influence relative des différentes sources d'informations - avec les informations sensorimotrices pour le modèle comparateur et les informations externes au système moteur dans la théorie de la causalité mentale apparente - et (ii) leur fiabilité qui est généralement en faveur des informations somatosensorielles. Autrement dit, les sujets sains s'appuient principalement sur le modèle de la prédiction motrice car la fiabilité des informations sensorimotrices est généralement plus élevée. Inversement, la fiabilité du modèle de la causalité mentale apparente augmentera au fur et à mesure que la fiabilité du modèle de prédiction déclinera.

Figure 3 : Les modèles neurocognitifs du sens d'agentivité (SoA)



(F) en vert correspond au modèle de Frith de la prédiction motrice où le SoA est lié à la bonne adéquation entre l'état prédit et le retour des informations somatosensoriels avec pour conséquence une atténuation sensorielle. (W) en violet correspond au modèle rétrospectif de Wegner avec la causalité mentale apparente dans lequel le SoA est lié à une concordance séquentielle et temporelle entre l'état désiré et l'état réel. Schéma inspiré de Blackemore, Wolpert & Frith, Trends Cogn Sci, 2002.

Au travers de ces différents modèles, on comprend que le SoA est influencé par des facteurs importants comme le retour sensoriel de l'action et le contexte social. De plus, deux autres facteurs essentiels sont à considérer, à savoir (i) le délai temporel entre l'action et ses effets (Pyasik et al., 2018), plus ce délai est court et plus l'agentivité est forte, et (ii) la force d'interaction, c'est-à-dire la concordance entre la force prédite et exercée par une action et le retour de force ressenti (Akselrod et al., 2021).

De manière bien distincte au SoA, le processus d'attribution de l'action attribuera l'action à soi (« *self-agency* »), impliquant surtout l'insula antérieure (Craig, 2009; Farrer & Frith, 2002), ou attribuera l'action à autrui (« *other-agency* »), impliquant surtout le cortex pariétal inférieur avec le gyrus angulaire (Farrer & Frith, 2002; Sperduti et al., 2011).

Au niveau expérimental, il existe deux catégories de mesures du SoA (Braun et al., 2018; Haggard, 2017; Moore, 2016) :

- Des mesures explicites, dites subjectives, qui interrogent directement le SoA en utilisant des questionnaires sur l'expérience agentive. Il est important de noter que ces mesures sont sensibles à l'influence des biais cognitifs tels que les biais de motivation, de performance, de désirabilité ou d'autosatisfaction ;

- Des mesures implicites, dites objectives, qui évaluent indirectement le SoA via d'autres mesures quantifiables qui sont liés à l'expérience agentive mais dont l'évaluation ne nécessite pas de penser explicitement au SoA, ce qui rend ces mesures moins sensibles aux biais cognitifs. Les mesures implicites du SoA sont (i) l'atténuation sensorielle - explicitée dans le modèle de la prédiction motrice de Frith et qui est d'autant plus forte que le SoA est fort - (ii) et le liage intentionnel qui

correspond au délai mesuré entre la réalisation d'une action et ses conséquences : ce délai est plus court dans les actions volontaires que dans les actions involontaires, une compression temporelle d'autant plus forte que le SoA est fort (Haggard et al., 2002).

Une synthèse du SBO et du SoA est présentée dans le tableau 1.

Tableau 1 : Le sens d'agentivité (SoA) et le sens de propriété du corps (SBO)

	SoA	**SBO**
Condition	- Mouvement volontaire	- Immobile ou mouvement
Modèles théoriques	- La théorie de la prédiction motrice - La théorie de la causalité mentale apparente - La théorie d'intégration des indices du sens de l'action	- Le modèle d'intégration multisensorielle probabiliste
Aires cérébrales	- Le cortex préfrontal - L'aire motrice supplémentaire - Le lobe pariétal inférieur droit - Le cervelet	- Le cortex pariétal - Le cortex prémoteur ventral - L'insula antérieure - Le cortex somatosensoriel
Facteurs d'influence	- Le contrôle moteur - Le retour sensoriel - Le contexte social - Le délai temporel - La force d'interaction	- Les règles spatiales - Les règles temporelles - La règle de la forme humanoïde
Mesures implicites	- L'atténuation sensorielle - Le liage intentionnel	- Le biais proprioceptif

Grâce à ces éléments, on comprend que le SBO et le SoA sont basés sur des concepts Bayésiens et qu'ils reposent sur les capacités d'un individu à prédire, comparer et corriger les erreurs de prédiction. **L'approche Bayésienne du TSPT postule que ce processus de prédiction est altéré après un trauma, affectant selon nos hypothèses le SBO et le SoA par extension. Reste à savoir quels sont les outils validés qui permettent d'évaluer le SBO et le SoA, tel est le sujet de la prochaine partie.**

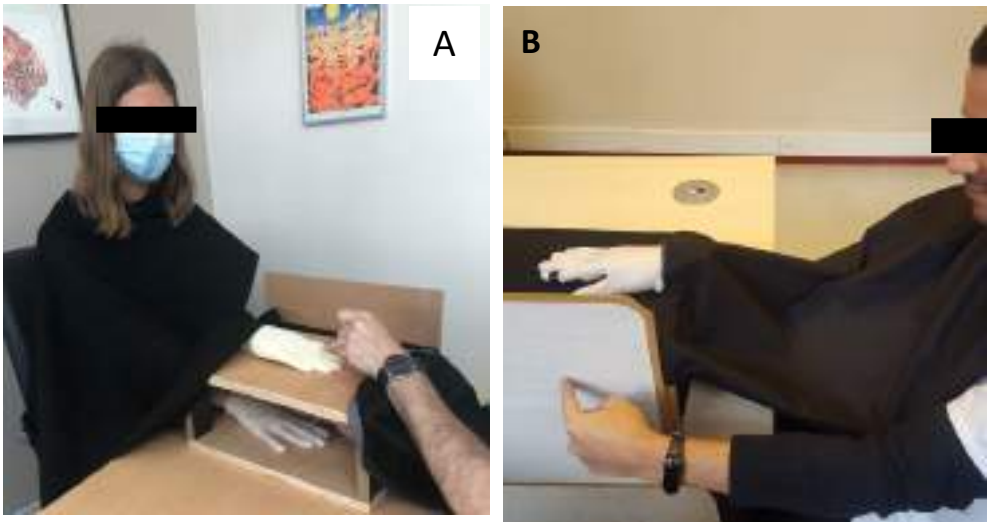
1.4. L'illusion de la main en caoutchouc

La méthode de référence pour étudier le sens de propriété du corps (*Sense of Body Ownership*, SBO) est l'illusion de la main en caoutchouc (*Rubber Hand Illusion*, RHI) (Botvinick & Cohen, 1998) dans laquelle le sujet place sa main habillée d'un gant en caoutchouc dans une boîte de manière à ce que sa main soit dissimulée et décalée par rapport à une fausse main en caoutchouc qui est visible par le sujet (Figure 4). Selon la théorie du codage prédictif (Friston, 2005, 2011), avec des caresses de pinceaux synchrones sur l'index des deux mains, le cerveau du participant prédit une sensation tactile au niveau de la fausse main – qui est visible – mais la ressent au niveau la vraie main – qui est dissimulée. Il s'agit d'une erreur de prédiction générant un conflit visuo-tactile que le cerveau corrige en mettant à jour les représentations mentales du corps en intégrant la fausse main dans le schéma corporel, c'est le processus d'*embodiement* qui génère la sensation que la fausse main devient la vraie main avec un ressenti des caresses de pinceau au niveau de la fausse main (Ehrsson, 2020). Ce phénomène est permis par la vision qui a un degré de précision et de fiabilité supérieur aux autres sens – dans les conditions normales – ce qui lui permet de moduler les autres régions cérébrales somato-sensorielles impliquées dans la RHI, un processus également appelé réduction descendante de

l'erreur de prédiction (Zeller et al., 2016). La RHI met ainsi en évidence les mécanismes bayésiens de prédiction et de perception qui sous-tendent le SBO et la RHI (Litwin, 2020). En pratique, la RHI est générée au bout de 10 secondes (della Gatta et al., 2016; Ehrsson et al., 2005) uniquement si les règles du SBO sont respectées, à savoir :

- Les mains doivent être placées en position égocentrique (Ehrsson, 2020) ;
- Les mains doivent être placées dans un espace péri-personnel limité (Lloyd, 2007) ;
- Une stimulation synchrone entre les deux mains doit être réalisée avec un biais temporel < 300 msec (Shimada et al., 2014) ;
- Les mains doivent être placées en congruence anatomique pour avoir une perception cohérente du corps humain aussi appelée « *plausibilité anatomique* » (Tsakiris et al., 2010).

Figure 4 : L'illusion de la main en caoutchouc

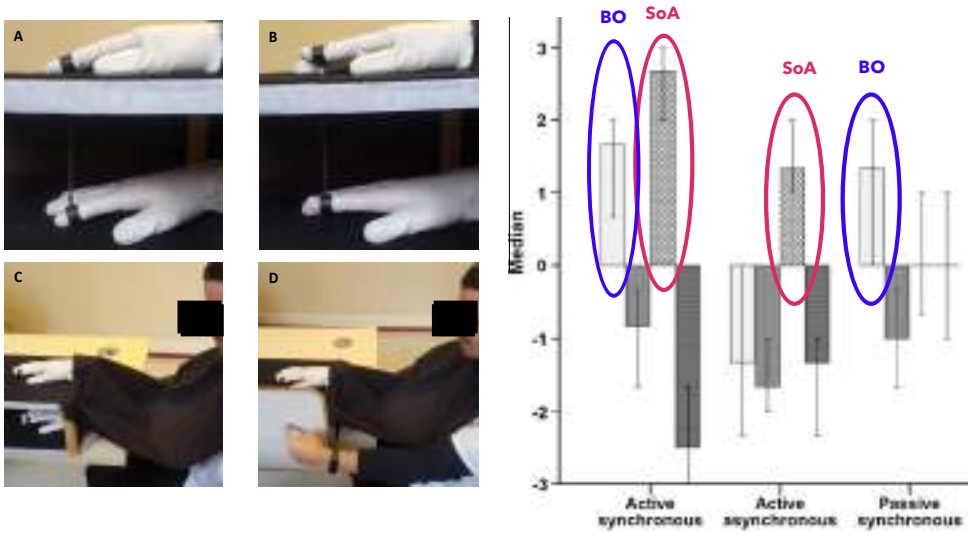


(A) Stimulation synchrone en congruence anatomique avec un pinceau entre la vraie main du sujet, qui est dissimulée dans la boite et invisible aux yeux du sujet, et la main factice placée au-dessus de la boite et visible par le sujet. (B) Pointage de la hauteur ou le sujet ressent sa vraie main pour la mesure du biais proprioceptif.

Deux mesures du SBO sont possibles avec la RHI (Botvinick & Cohen, 1998). La première est une mesure sensorielle objective appelée le biais proprioceptif qui mesure en centimètres la différence de hauteur ressentie par le sujet concernant la localisation de sa vraie main avant et après une stimulation : un biais proprioceptif positif indique un déplacement du ressenti de la vraie main vers la main factice, c'est-à-dire vers le haut (Figure 4). La seconde mesure est une mesure perceptive subjective qui utilise un auto-questionnaire pour évaluer la force de l'illusion perçue. Bien que ces deux mesures s'influencent mutuellement, elles seraient dissociables et basées sur deux processus cognitifs différents (Gallagher et al., 2021). Le biais proprioceptif serait principalement lié aux informations sensorielles (« *likelihood* ») alors que les mesures subjectives par questionnaires correspondraient à l'intensité perçue de l'illusion qui provient d'un équilibre entre les informations sensorielles

(« *likelihood* ») et les croyances préalables (« *prior* ») (Gallagher et al., 2021), c'est donc une mesure perceptuelle du SBO (« *likelihood* » x « *prior* »). D'un point de vue méthodologique, la RHI est influencée par de nombreux facteurs qu'il convient de prendre en considération dans les études sur le sujet (Riemer et al., 2019), notamment l'état psychique du participant, la douleur physique, le sexe ou bien l'âge (Bauer et al., 2018; Fang et al., 2019; Longo et al., 2008; Ramakonar et al., 2011). Bien que la RHI n'évalue que le SBO au niveau d'une main, cet outil est pertinent si on considère les résultats d'une récente étude menée sur un large échantillon de la population générale qui a démontré que le niveau de conscience corporelle est plus élevé aux extrémités des membres supérieurs et inférieurs, ce qui est compréhensible car ce sont les zones anatomiques les plus en interactions avec notre environnement, et que la qualité de la conscience corporelle de ces zones distales sont corrélées à la qualité de la conscience corporelle du reste du corps (Hidaka et al., 2021). De plus, les zones cérébrales impliquées dans la RHI ne sont pas spécifique puisque les mêmes zones cérébrales sont impliqués dans la *Rubber Foot Illusion* incluant les gyri frontaux, l'aire motrice supplémentaire, le lobule pariétal inférieur, le précunéus, le thalamus et le cervelet (Matsumoto et al., 2020).

Figure 5 : Illustration de l'illusion de la main en caoutchouc dynamique avec la double dissociation entre le sens de propriété du corps et le sens de l'agentivité



À gauche, la RHI dynamique avec l'index de la main factice (sur la boite) et de la vraie main (dans la boite) qui sont reliés par une tige rigide pour rendre leurs mouvements dépendants. À droite, le sens de propriété du corps en bleu (BO) et le sens de l'agentivité en rouge (SoA) peuvent être isolés en condition asynchrone et passive respectivement (figure extraite et adaptée de Kalckert & Ehrsson, 2014).

À ce jour, une seule étude a réalisé la RHI chez des patients souffrant de TSPT (Rabellino et al., 2018). Les auteurs ont ainsi démontré que le groupe souffrant de TSPT non-dissociatif avait des mesures subjectives et objectives à la RHI plus faibles que les sujets sains. Les auteurs ont expliqué ces résultats principalement par un manque d'engagement et d'évitement dans la tâche cognitive. Dans une approche bayésienne, les résultats peuvent être expliqués par des croyances et une conscience intéroceptive très fortes et saillantes qui sont insensibles aux nouvelles informations

sensorielles. Bien que très intéressante, cette étude se base sur des groupes de très faibles effectifs (4 à 7 sujets par groupe) et elle ne prend pas en compte le sens de l'agentivité (SoA) qui est une mesure absente de la RHI dans sa version initiale.

C'est ainsi que Kalckert et Ehrsson (2012, 2014, 2017) ont proposé l'illusion de la main en caoutchouc dynamique (*The Moving Rubber Hand Illusion*) dans laquelle l'induction de l'illusion est assurée par des stimulations visuomotrices émanant des mouvements volontaires de l'index du sujet, ce dernier étant relié par une tige rigide à l'index de la fausse main rendant ainsi leurs mouvements solidaires (Figure 5). Cette version dynamique de la RHI comprend donc des mouvements volontaires, impliquant des intentions et des prédictions motrices à partir des copies d'efférence, et permet d'évaluer dans un même paradigme expérimental le SBO et le SoA. Chez des sujets sains, en congruence anatomique, ce paradigme expérimental a démontré que (i) les mouvements synchrones entre la main réelle et la fausse main induisent un SoA et un SBO, avec un *embodiement* (incarnation) de la main factice. En revanche, (ii) les mouvements asynchrones abolissaient le SBO, sans embodiement de la main factice, mais ne perturbait pas le SoA permettant ainsi une évaluation spécifique du SoA, et que (iii) les mouvements synchrones passifs abolissaient le SoA contrairement au SBO qui persistait permettant ainsi une évaluation spécifique du SBO (Figure 5). Ces résultats ont ainsi mis en évidence que le SBO et le SoA sont deux composantes de la conscience corporelle qui sont à la fois en interaction mais dissociables (Kalckert & Ehrsson, 2012, 2014, 2017; Longo et al., 2008; Seghezzi et al., 2019). La RHI dynamique permet d'évaluer le SBO à la fois à travers des mesures objectives, avec le biais proprioceptif, et à travers des mesures subjectives par auto-questionnaires. Le SoA quant à lui est uniquement évaluable au moyen de mesures subjectives par auto-questionnaires. Les questionnaires de la RHI comprennent 8 énoncés (4 énoncés pour le SoA et 4 énoncés pour le SBO) et 8 énoncés contrôle (4 énoncés contrôles pour le SoA et 4 énoncés contrôles pour le SBO) qui servent généralement à vérifier la conformité de la tâche et le niveau de suggestibilité du participant (Figure 6).

Figure 6 : Auto-questionnaire de l'illusion de la main en caoutchouc dynamique

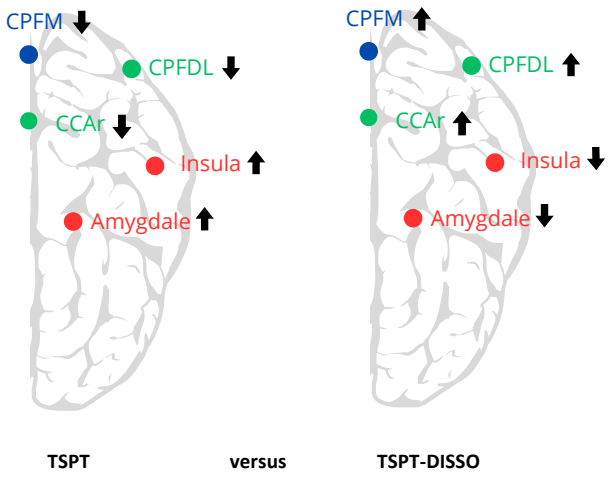
Propriété du corps propre 1. Je sentais comme si je regardais ma propre main 2. Je sentais comme si la main en caoutchouc faisait partie de mon corps 3. C'était comme si je ressentais le mouvement de mon doigt à l'endroit où le doigt en caoutchouc bougeait 4. Je sentais comme si la main en caoutchouc était ma main	**Propriété du corps propre (contrôle)** 5. Je sentais comme si ma vraie main devenait comme en caoutchouc 6. C'était comme si j'avais plus qu'une main droite 7. C'était comme si la main en caoutchouc se décalait vers ma vraie main 8. Je sentais comme si je n'avais plus de main droite, comme si ma main droite avait disparu
Agentivité 9. La main en caoutchouc bougeait exactement comme je le voulais, comme si elle obéissait à ma volonté 10. Je sentais comme si je contrôlais les mouvements de la main en caoutchouc 11. Je sentais comme si j'étais à l'origine du mouvement que je voyais 12. Chaque fois que je bougeais mon doigt, je m'attendais à ce que le doigt en caoutchouc bouge de la même façon	**Agentivité (contrôle)** 13. Je sentais comme si la main en caoutchouc contrôlait ma volonté 14. Je sentais comme si la main en caoutchouc contrôlait mes mouvements 15. Je pouvais sentir le mouvement quelque part entre ma vraie main et la main en caoutchouc 16. C'était comme si la main en caoutchouc avait sa propre volonté

À ce jour, la RHI dynamique n'a jamais été utilisée pour étudier le SBO et le SoA dans le TSPT et c'est bien ce paradigme expérimental que nous avons utilisé dans ce travail de thèse pour étudier la conscience du corps dans le TSPT. Cependant, il nous semble important de ne pas négliger la présence de certains symptômes qui peuvent être associés au TSPT, à savoir **les symptômes dissociatifs afin de considérer leurs potentiels impacts sur les processus de la conscience du corps**.

1.5. Le TSPT sous-type dissociatif

Le TSPT ne constitue pas une pathologie homogène avec l'existence d'un sous-type dissociatif. Dans le TSPT dissociatif, les individus décrivent fréquemment et de manière proéminente la présence de symptômes de déréalisation (sentiment que le monde extérieur est irréel, comme dans un rêve, lointain et distant) et de dépersonnalisation (sentiment d'étrangeté et de distance par rapport à son propre corps) (APA, 2013). Le sous-type dissociatif représente environ 30 à 40% des TSPT (Lanius et al., 2007; White et al., 2022) et seraient la conséquence d'un « *syndrome de déconnexion limbique* » (Sierra & Berrios, 1998). Face à la menace neurologique et cardiaque que représente une hyperactivité excessive de l'amygdale, des mécanismes d'inhibition exceptionnels peuvent se mettre en place caractérisés par une hyperactivité inhibitrice du CPF. Contrairement au TSPT qui se caractérise par une hyperactivité de l'amygdale associée à une hypo-régulation du CPF, le sous-type dissociatif présente une hypoactivité de l'amygdale, de l'insula antérieure et du système limbique, secondaires à une sur-inhibition du CPF qui laisse place à une anesthésie émotionnelle (Nicholson, Harricharan, et al., 2020; Nicholson, McKinnon, et al., 2020) (Figure 7). Le profil neurobiologique du TSPT de type dissociatif est donc radicalement différent de celui du TSPT.

Figure 7 : Neurobiologie du trouble de stress post-traumatique (TSPT) et de son sous-type dissociatif (TSPT-DISSO)



Au vu de ces éléments, notre étude portant sur le SoA et le SBO **se doit de distinguer les patients avec un TSPT de ceux avec un TSPT de sous-type dissociatif** car ces derniers risquent de présenter des anomalies de la conscience du corps propres aux mécanismes de la dissociation en considérant les éléments suivants :

- L'hyperactivité du CPF ;
- L'hypoactivité de l'insula antérieure qui est impliquée dans la conscience corporelle, le SBO et le « *self-agency* » ;
- L'anesthésie émotionnelle car le SBO est influencé par les émotions du fait de l'intéroception ;
- Les conséquences de la dissociation sur les fonctions exécutives et attentionnelles ;
- Les anomalies du glutamate car ce dernier joue un rôle important dans l'intégration sensorielle et dans les processus de prédiction.

De ce fait, notre travail de thèse s'est fixé pour objectif d'étudier la conscience du corps, incluant le SBO et SoA, dans le TSPT et son sous-type dissociatif au moyen de la RHI dynamique. Il existe de nombreux facteurs d'influence du SBO et SoA. L'une des variables d'intérêt émergente est l'immobilité tonique que nous allons présenter dans la partie suivante.

1.6. L'immobilité tonique

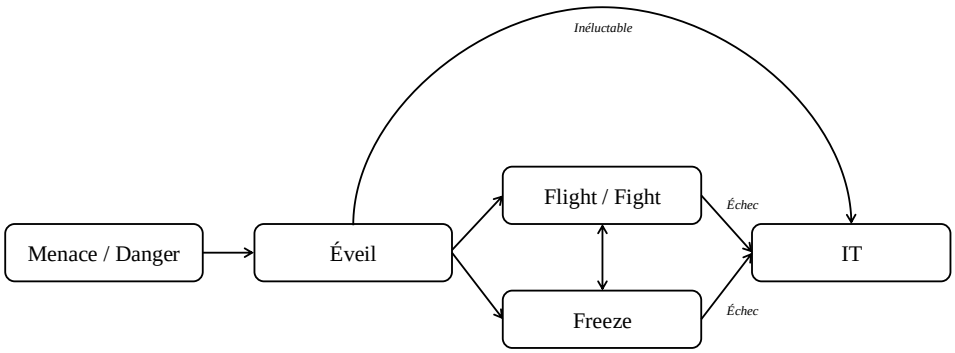
Que ce soit chez les humains ou les animaux, la perception d'un danger va engendrer un ensemble de comportements de défense qui sont très étudiés depuis le XX^{ème} siècle. Darwin dans son œuvre « *L'expression des émotions chez l'Homme et les animaux* » (Darwin, 1929) considérait que les émotions étaient un avantage phylogénétique pouvant susciter des mécanismes d'action bénéfiques pour la survie d'un organisme. Les comportements de défense face à une menace sont aujourd'hui connus sous le terme de cascade de défense. Chez les humains, la cascade de défense comprend : l'éveil (« *arousal* ») qui est la première étape d'activation de la cascade de défense ; le combat (« *fight* ») et la fuite (« *flight* ») qui sont des réponses actives (activation motrice) pour faire face à une menace ; le gel (« *freeze* ») qui est une réponse passive (inhibition motrice) dans laquelle la fuite ou de combat sont mis en attente (Kozlowska et al., 2015) (Figure 8). D'un point de vue neurobiologique, plusieurs structures cérébrales sont impliquées dans la cascade de défense, à savoir principalement le cortex cingulaire antérieur, le CPF ventromédian, l'amygdale, l'hypothalamus, la substance grise périaqueducale (SGPA) et le système nerveux autonome (Hagenaars et al., 2014; Kozlowska et al., 2015; Roelofs, 2017). Il est important de distinguer :

- Le combat (« *fight* ») et la fuite (« *flight* ») qui se caractérisent par une activation du système nerveux sympathique, médiée par l'hypothalamus et la SGPA dorsolatérale, le tout associée à une analgésie non-opioïde ;
- Le gel (« *freeze* ») qui se caractérise par une activation du système nerveux sympathique et parasympathique, cette dernière étant médiée par les connexions

directes entre le noyau central de l'amygdale et la SGPA ventrolatéral, le tout associé à une analgésie opioïde.

En cas d'échec de la cascade de défense pour mettre l'individu à l'abri, ou face à une menace inéluctable, la réponse finale de la cascade de défense est l'immobilité tonique (IT) (Figure 8). L'IT dépend du système nerveux parasympathique, et notamment le nerf vague, avec une analgésie opioïde (Sakai, 2021). Chez les humains, l'IT est un mécanisme de défense involontaire caractérisée par une paralysie temporaire, une conscience préservée, une posture de type catatonique, une inhibition motrice, une rigidité musculaire, une analgésie, un mutisme, une sensation de froid, des tremblements et le regard fixe (Kozlowska et al., 2015). L'IT est un mécanisme de défense phylogénétiquement ancien qui est présent chez beaucoup d'espèce et qui est utilisée pour désactiver le réflexe de mise à mort du prédateur, ou le décourager de consommer en mimant la mort, tel un cadavre rigide et immobile.

Figure 8 : La cascade de défense



Abréviation : IT : Immobilité Tonique.

Chez les humains, l'IT a d'abord été identifiée chez des femmes victimes d'agressions sexuelles et fut longtemps appelé la « *rape-induced paralysis* » (de Heer & Jones, 2024; Galliano et al., 1993; Suarez & Gallup, 1979). Des études ultérieures ont démontré que l'IT se retrouvait également chez les hommes hors contexte d'agression sexuelle (Bados et al., 2008; Maia et al., 2015; Portugal et al., 2012), et ce fut notamment le cas durant la période de pandémie liée au COVID-19 (de Souza Junior et al., 2024). Durant les évènements traumatiques, l'IT peut survenir de manière péritraumatique, et constituer un facteur de risque d'apparition d'un TPST ultérieur, mais aussi se manifester lors d'évènements stressants une fois le TSPT constitué (Fragkaki et al., 2016). Dans ce contexte, l'IT modérée à sévère est surreprésentée chez les patients psychotraumatismés, affectant entre 7.6% à 37% des patients souffrants d'un TSPT contre seulement 0.6% à 6.3% des sujets sans exposition traumatique ou exposés sans TSPT (Hagenaars, 2016). De manière très importante, plusieurs travaux ont démontré que l'IT est associée à des TSPT plus sévères, avec une réponse aux traitements pharmacologiques qui est moindre, en particulier chez les femmes (Coimbra et al., 2023; Fiszman et al., 2008). Dans ce contexte, on comprend l'importance de pouvoir évaluer l'IT.

L'échelle d'immobilité tonique (*Tonic Immobility Scale Adult Form*, TIS) a été le premier instrument d'auto-évaluation validé en anglais pour évaluer l'IT chez les femmes victimes de viol ou d'agressions sexuelles avec une bonne cohérence interne ($\alpha = 0,86$) (Forsyth et al., 2000). La TIS contient 10 items pour lesquels la personne évalue dans quelle mesure (1) elle s'est sentie figée ou paralysée, (2) a été incapable de bouger même sans contrainte physique, (3) a tremblé, (4) a été incapable de crier, (5) s'est sentie engourdie ou n'a pas ressenti de douleur, (6) a eu froid, (7) a ressenti des sentiments de peur/panique, (8) a craint pour sa vie, (9) s'est sentie détachée d'elle-même, (10) ou s'est sentie détachée de ce qui se passait autour d'elle pendant le traumatisme. Par la suite, plusieurs études ont tenté de valider la TIS dans d'autres types de population, identifiant parfois plusieurs dimensions dans la TIS que sont la peur et la dissociation, mais ces études ont été le plus souvent confrontée à une réduction des propriétés psychométriques de la TIS (Bados & Peró, 2015; de Kleine et al., 2018; Dokkedahl et al., 2024; Fusé et al., 2007; Rocha-Rego et al., 2009) (Tableau 2).

Tableau 2 : Les alphas de Cronbach des études de validation de l'échelle d'immobilité tonique

Articles	Population d'étude	N	Items	IT	Peur	Disso
Forsyth, 2000	Victimes d'agressions sexuelles	–	10	.86	–	–
Fusé, 2007	Survivantes d'agressions sexuelles	88	11	.94	.90	–
Rocha-Rego, 2009	TSPT après des violences urbaines	32	4	.83	–	–
Bados, 2015	Étudiants à l'université	432	12	.72	.32*	–
de Kleine, 2018	TSPT chronique	184	10	.71	.52*	–
Dokkedahl, 2024	Victimes de terrorisme	794	10	.81	.87	.87

Abreviations : Items : nombre d'items, Dim : nombre de dimension, IT : immobilité tonique, Disso : dissociation.

* indique des dimensions qui ont été retirés dans la version finale de la TIS analysée

À ce jour, il n'existe pas d'échelle validée en français pour évaluer l'IT. **L'un des objectifs de ce travail de thèse a été de traduire en français et valider une version française de l'échelle d'immobilité tonique de Forsyth (2000).**

1.7. La stimulation électrique transcrânienne à courant continu (tDCS)

En termes de prise en charge thérapeutique, les recommandations actuelles préconisent en premier lieu les thérapies centrées sur le trauma, incluant les thérapies cognitivo-comportementales (TCC) (TCC-centrées sur le trauma, thérapies d'exposition, thérapies des processus cognitifs) et l'EMDR (E*ye Movement Desensitization and Reprocessing)* (American Psychiatric Association, 2017; American Psychological Association, 2017; Haute Autorité de Santé, 2017; Katzman et al., 2014; Milev et al., 2016; National Institute for Health and Care Excellence, 2018). La prise en charge pharmacologique doit intervenir en cas d'échec ou d'inaccessibilité des thérapies centrée centrées sur le trauma, ou en cas de TSPT sévère, et repose d'abord sur l'utilisation des inhibiteurs sélectifs de recapture de la sérotonine tels que la paroxétine ou la sertraline qui ont l'Autorisation de Mise sur le Marché en France pour le TSPT (Haute Autorité de Santé, 2017). Cependant, la difficulté d'accès aux thérapies du trauma associée à une réponse moyenne des traitements pharmacologiques, le taux de réponse aux traitements

pharmacologiques étant estimé entre 60 à 70% pour un taux de rémission entre 30 à 40% (Alexander, 2012 ; Ballenger et al., 2000 ; Stein, Kline, & Matloff, 2002) avec un taux de rechute à 6 mois de 20% (Davidson et al., 2005), ont amené les chercheurs et les médecins à proposer de nouveaux axes thérapeutiques comme la stimulation transcrânienne à courant continu (*transcranial Direct Current Stimulation*, tDCS).

La tDCS est une technique de neuromodulation non-invasive bien tolérée permettant de moduler l'excitabilité cérébrale de manière focale et superficielle au moyen d'une stimulation directe par un courant continue (Antal et al., 2009). Connaissant un essor grandissant ces dernières décennies, cette technique se veut prometteuse dans la prise en charge de nombreuses pathologies psychiatriques telles que la dépression, les hallucinations verbales de la schizophrénie, les troubles anxieux, les addictions, les troubles obsessionnelles compulsifs et le trouble de stress post-traumatique (Kuo et al., 2014; Manocchio et al., 2025; Wang et al., 2024; Zheng et al., 2024). La tDCS repose sur l'utilisation d'un champ électrique de faible intensité, entre 1 à 2 milliampères (mA), délivré sur le scalp par l'intermédiaire d'électrodes de polarité différente, à savoir cathodique et anodique (Shin et al., 2015). Bien que les mécanismes d'action de la tDCS ne soient pas encore très bien élucidés (Monai & Hirase, 2018 ; Fertonani & Miniussi, 2017), il ressort des études que la stimulation anodique pourrait augmenter l'excitabilité des neurones corticaux en regard de l'anode, en favorisant la dépolarisation membranaire, alors que la cathode tendrait plutôt à favoriser l'hyperpolarisation des neurones corticaux avec pour effet de diminuer leur excitabilité Yamada & Sumiyoshi, 2021). L'effet à court terme de la tDCS dépend donc d'une altération des potentiels infraliminaires de la membrane de repos induit par le passage du courant électrique (Nitsche et al., 2005) et dont l'effet post-stimulation est limité dans le temps selon la durée et l'intensité de la stimulation (Bikson et al., 2016). À ce jour, de nombreuses méta-analyses et revues de la littérature ont confirmées la bonne tolérance et sécurité de la tDCS (Aparício et al., 2016 ; Bikson et al., 2016 ; Brunoni et al., 2011 ; Nikolin et al., 2018), y compris dans des populations vulnérables comme les femmes enceintes ou allaitantes (Laurin et al., 2022), faisant de la tDCS un soin avec un faible taux d'abandon < 10% (Bikson et al., 2016).

Le tableau 3 résume les résultats d'une *review* que nous avons réalisé dans *PubMed* concernant les études randomisées contrôlées publiées entre 2019 et 2024 avec les *Mesh Terms* suivants : *(((tdcs) OR (transcranial direct current stimulation)) AND ((PTSD) OR (posttraumatic stress disorder)))*. On constate que les études ont été réalisées sur des populations très différentes, civiles ou militaires, très majoritairement féminines ou masculines respectivement, et c'est important à prendre en compte car les effets de la tDCS peuvent-être différents selon le sexe comme en témoigne l'influence des œstrogènes sur l'excitabilité corticale (Rudroff et al., 2020). De plus, les études concernées avaient des protocoles de tDCS très hétérogènes avec les résultats mitigés dans lesquels la majorité des études rapportaient une réduction significatives des symptômes du TSPT mais sans différence avec le groupe placebo (Ahmadizadeh et al., 2019; Eyraud et al., 2024; Smits et al., 2022; van 't Wout-Frank et al., 2019). Une seule étude a montré une efficacité supérieure de la tDCS par rapport au placebo mais cette amélioration fut transitoire (van 't Wout-Frank et al., 2024). Allant dans ce sens, une récente méta-

analyse en réseau évaluant l'efficacité de la tDCS dans le TSPT conclue que la tDCS permet une réduction significative des symptômes du TSPT, mais de manière transitoire, et sans efficacité supérieure à la condition placebo (Liu et al., 2024). Cependant, il faut noter que d'autres méta-analyses récentes sur ce même sujet apportent des données contradictoires avec des études qui soutiennent l'efficacité de la tDCS pour réduire les symptômes du TSPT tout en améliorant les symptômes anxieux et dépressifs comorbides (Xie et al., 2024; Yang et al., 2025).

Tableau 3 : Les études randomisées contrôlées évaluant les effets de la tDCS dans le TSPT

Études	N	Âge	Fe	Pop	Échelle	Courant	Éponge	Anode	Cathode	Durée	Nombre séances	Exposition	Follow-up	Efficacité
Ahmadizadeh, 2019	40	44	65%	Civile	PCL-5	2mA	35cm^2	CPFdl G	CPFdl D	20 min	10	Aucune	1 mois	1 mois
Van't Wout-Franck, 2019	12	41	0%	Militaire	PCL-5	2 mA	NC	CPFvm G	PO8	24 min	6	Réalité virtuelle	1 mois	1 mois
Smits, 2022	96	41	7%	Militaire	PCL-5	1.25mA	35cm^2	T4-F8 D	COF G	20 min	1-5	Tâche cognitive	12 mois	12 mois
Van't Wout-Franck, 2024	54	46	6%	Militaire	CAPS-5 PCL-5	2mA	9 cm^2	CPFvm G	Mastoïde	25 min	6	Réalité virtuelle	3 mois	1 mois
Eyraud, 2024	63	32	80%	Civile	CAPS-5 PCL-5	2mA	35cm^2	CPFdl G	COF D	20 min	10	Script traumatique	3 mois	3 mois

Le code couleur de la dernière colonne : [orange] = réduction significative des scores du trouble de stress post-traumatique sans différence significative avec le groupe placebo, [vert] = réduction significative des scores du trouble de stress post-traumatique significativement plus important que le groupe placebo. La durée indiquée correspond au temps de suivi où les résultats était significatifs. Abréviations : FE : % de femmes, Pop : population étudiée, PCL-5 : PTSD Checklist for DSM-5, CAPS-5 : Clinician-Administered PTSD Scale for DSM-5, mA : milliampère, CPFdl : cortex préfrontal dorsolatéral, CPFvm : cortex préfrontal ventro-médian, G : gauche, D : droite, COF : cortex orbitofrontal.

Dans le cadre du TSPT, la tDCS est le plus souvent utilisée pour stimuler différentes structures préfrontales. Le CPFdl gauche est une cible privilégiée au vu de son implication dans la régulation des émotions négatives, la mémoire de travail et l'attention, le contrôle des pensées intrusives, la modulation des réponses de peur conditionnée, et il aide indirectement à réduire l'hyperactivité de l'amygdale en renforçant le contrôle *top-down* (Van't Wout et al., 2017). En d'autres termes, il s'agit de réactiver le frein cognitif sur les circuits émotionnels dans le TSPT à l'aide de la tDCS. Le CPFdl gauche est également directement impliqué dans les processus neurocognitifs de la conscience du corps tels que nous l'avons exposé précédemment. Il faut également prendre en compte les autres changements potentiels qui peuvent être induits par la tDCS concernant les fonctions attentionnelles ou exécutives, ainsi que des modifications de la régulation des émotions, car ils peuvent directement ou indirectement impacter le SoA ou le SBO. **Au vu de ces éléments, il nous a semblé intéressant de réaliser la RHI dynamique en même temps qu'une stimulation anodale par tDCS *online* appliquée en regard du CPFdl gauche pour avoir des éléments de réponse**. Ce montage *online* permettra d'analyser les effets de la tDCS sur le SoA et le SBO, tout en déterminant pour quel profil de patients la tDCS anodale appliquée au niveau du CPFdl gauche pourrait être intéressante à réaliser dans un objectif de médecine personnalisée. Au-delà de ces considérations médicales, la réalisation d'une stimulation par tDCS *online* durant la RHI **permettra également de mieux comprendre le rôle du CPFdl gauche dans les processus neurocognitifs du SoA et SBO chez les patients souffrant d'un TSPT**. Plusieurs études ont ainsi déjà utilisé la tDCS chez des sujets sains pour mieux comprendre les fonctions du CPFdl

gauche (Khalighinejad et al., 2016), du gyrus angulaire droit (de Boer et al., 2020; Khalighinejad & Haggard, 2015), ou du cervelet (Bonuomo et al., 2025) dans les processus neurocognitifs de la conscience de soi.

1.8. Hypothèses et objectifs

Cette première partie arrive à son terme et nous a permis de présenter les concepts clés présents dans nos travaux de recherches tout en exposant les différents axes de réflexions. Ainsi, nous avons formulé plusieurs hypothèses :

- Il existe des anomalies du SBO et du SoA dans le TSPT qui sont différents selon la nature dissociative du TSPT (TSPT-DS) ;
- Les anomalies du SBO et SoA dans le TSPT et TSPT-DS peuvent être appréhendées par la théorie prédictive ;
- La tDCS appliquée au niveau du CPFdl gauche va modifier le SBO et/ou le SoA ;
- L'IT est une donnée importante à pouvoir évaluer dans les travaux sur le TSPT.

Ainsi, plusieurs objectifs ont été définis, à savoir :

- Étudier le SBO et la SoA au moyen de la RHI dynamique dans un groupe de patients souffrant d'un TSPT *versus* un groupe de patients souffrant d'un TSPT-DS comparé un groupe de sujets sains ;
- Proposer un modèle de compréhension des anomalies du SBO et SoA dans le TSPT et le TSPT-DS en utilisant la théorie prédictive ;
- Évaluer les effets de la tDCS anodale *on-line* appliquée en regard du CPFdl gauche sur les scores de SBO et de SoA ;
- Valider une échelle française de l'IT.

Dans la deuxième partie, certaines connaissances présentées en première partie seront reprises, développées et articulées les unes avec les autres pour proposer un modèle explicatif des troubles de la conscience du corps dans le TSPT et la dissociation. La troisième partie présentera l'étude de la RHI dynamique chez les patients souffrant d'un TSPT versus TSPT-DS, ainsi que les effets de la tDCS sur les performances de la RHI. Pour finir, une quatrième partie présentera une étude de validation d'une échelle traduite en français pour évaluer l'IT avant de finir par une cinquième et dernière partie de discussion générale.

Bibliographie

Abela, J. R. Z., & D'Alessandro, D. U. (2002). Beck's cognitive theory of depression : A test of the diathesis-stress and causal mediation components. *The British Journal of Clinical Psychology*, *41*(Pt 2), 111-128. https://doi.org/10.1348/014466502163912

Ahmadizadeh, M. J., Rezaei, M., & Fitzgerald, P. B. (2019). Transcranial direct current stimulation (tDCS) for post-traumatic stress disorder (PTSD) : A

randomized, double-blinded, controlled trial. *Brain Research Bulletin*, *153*, 273-278. https://doi.org/van ’t Wout

Akselrod, M., Vigaru, B., Duenas, J., Martuzzi, R., Sulzer, J., Serino, A., Blanke, O., & Gassert, R. (2021). Contribution of interaction force to the sense of hand ownership and the sense of hand agency. *Scientific Reports*, *11*(1), 18069. https://doi.org/10.1038/s41598-021-97540-9

Alexander, W. (2012). Pharmacotherapy for Post-traumatic Stress Disorder In Combat Veterans : Focus on Antidepressants and Atypical Antipsychotic Agents. *P & T: A Peer-Reviewed Journal for Formulary Management*, *37*(1), 32-38.

Alonso, J., Angermeyer, M. C., Bernert, S., Bruffaerts, R., Brugha, T. S., Bryson, H., de Girolamo, G., Graaf, R., Demyttenaere, K., Gasquet, I., Haro, J. M., Katz, S. J., Kessler, R. C., Kovess, V., Lépine, J. P., Ormel, J., Polidori, G., Russo, L. J., Vilagut, G., … ESEMeD/MHEDEA 2000 Investigators, European Study of the Epidemiology of Mental Disorders (ESEMeD) Project. (2004). Sampling and methods of the European Study of the Epidemiology of Mental Disorders (ESEMeD) project. *Acta Psychiatrica Scandinavica. Supplementum*, *420*, 8-20. https://doi.org/10.1111/j.1600-0047.2004.00326

American Psychiatric Association. (1980). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders (DSM-3®)*. American Psychiatric Pub.

American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders (DSM-5®)*. American Psychiatric Pub.

American Psychiatric Association. (2017). *Clinical Practice Guideline for the Treatment of Posttraumatic Stress Disorder (PTSD) in Adults*. Washington: Author. https://www.apa.org/ptsd-guideline/ptsd.pdf

American Psychological Association. (2017). *Clinical Practice Guideline for the Treatment of Posttraumatic Stress Disorder (PTSD) in Adults*. Washington: Author. https://www.apa.org/ptsd-guideline/ptsd.pdf

Angelakis, S., & Nixon, R. D. V. (2015). The Comorbidity of PTSD and MDD : Implications for Clinical Practice and Future Research. *Behaviour Change*, *32*(1), 1-25. https://doi.org/10.1017/bec.2014.26

Antal, A., Paulus, W., & Nitsche, M. A. (2009). Principle and mechanisms of transcranial direct current stimulation (tDCS). *J Pain Manag*, *2*(3), 249-258.

Aparício, L. V. M., Guarienti, F., Razza, L. B., Carvalho, A. F., Fregni, F., & Brunoni, A. R. (2016). A Systematic Review on the Acceptability and Tolerability of Transcranial Direct Current Stimulation Treatment in Neuropsychiatry Trials. *Brain Stimulation*, *9*(5), 671-681. https://doi.org/10.1016/j.brs.2016.05.004

Auxéméry Y. L’état de stress post-traumatique comme conséquence de l’interaction entre une susceptibilité génétique individuelle, un évènement traumatogène et un contexte social. L’Encéphale. 2012; 38(5) : 373-80. Doi : 10.1016/j.encep.2011.12.003. (s. d.).

Bados, A., & Peró, M. (2015). Psychometric properties of the Modified Tonic Immobility Scale. *Anales de Psicología/Annals of Psychology*, *31*(1), 66-73.

Bados, A., Toribio, L., & García-Grau, E. (2008). Traumatic events and tonic immobility. *The Spanish Journal of Psychology*, *11*(2), 516-521. https://doi.org/10.1017/S1138741600004510

Ballenger, J. C., Davidson, J. R., Lecrubier, Y., Nutt, D. J., Foa, E. B., Kessler, R.

C., McFarlane, A. C., & Shalev, A. Y. (2000). Consensus statement on posttraumatic stress disorder from the International Consensus Group on Depression and Anxiety. *The Journal of Clinical Psychiatry*, *61 Suppl 5*, 60-66.

Bao, W., Gao, Y., Cao, L., Li, H., Liu, J., Liang, K., Hu, X., Zhang, L., Hu, X., Gong, Q., & Huang, X. (2021). Alterations in large-scale functional networks in adult posttraumatic stress disorder : A systematic review and meta-analysis of resting-state functional connectivity studies. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *131*, 1027-1036. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.10.017

Barrett, L. F., & Simmons, W. K. (2015). Interoceptive predictions in the brain. *Nature Reviews. Neuroscience*, *16*(7), 419-429. https://doi.org/10.1038/nrn3950

Barrois, C. (1998). *Les névroses traumatiques.* Paris Dunod.

Bauer, A., Hagenburger, J., Plank, T., Busch, V., & Greenlee, M. W. (2018). Mechanical Pain Thresholds and the Rubber Hand Illusion. *Frontiers in Psychology*, *9*, 712. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00712

Berger, W., Coutinho, E. S. F., Figueira, I., Marques-Portella, C., Luz, M. P., Neylan, T. C., Marmar, C. R., & Mendlowicz, M. V. (2012). Rescuers at risk : A systematic review and meta-regression analysis of the worldwide current prevalence and correlates of PTSD in rescue workers. *Social Psychiatry and Psychiatric Epidemiology*, *47*(6), 1001-1011. https://doi.org/10.1007/s00127-011-0408-2

Bikson, M., Grossman, P., Thomas, C., Zannou, A. L., Jiang, J., Adnan, T., Mourdoukoutas, A. P., Kronberg, G., Truong, D., Boggio, P., Brunoni, A. R., Charvet, L., Fregni, F., Fritsch, B., Gillick, B., Hamilton, R. H., Hampstead, B. M., Jankord, R., Kirton, A., … Woods, A. J. (2016). Safety of Transcranial Direct Current Stimulation : Evidence Based Update 2016. *Brain Stimulation*, *9*(5), 641-661. https://doi.org/10.1016/j.brs.2016.06.004

Bonuomo, M., Perrotta, D., Di Filippo, G., & Perri, R. L. (2025). Neurostimulation and Sense of Agency : Three tDCS Experiments on the Modulation of Intentional Binding. *Brain Sciences*, *15*(2), Article 2. https://doi.org/10.3390/brainsci15020176

Borenstein M. ESPT, facteurs de risques, facteurs de protection : État des lieux et prévention. In : Coutanceau R, Bennegadi R, Bornstein S. Stress, burn-out, harcèlement moral. Edition Dunod Paris; 2016. 163-80. (s. d.).

Botvinick, M., & Cohen, J. (1998). Rubber hands « feel » touch that eyes see. *Nature*, *391*(6669), 756. https://doi.org/10.1038/35784

Boudoukha, A. H. (2020). *Burn-out et stress post-traumatique* (2nd edition). Dunod.

Braun, N., Debener, S., Spychala, N., Bongartz, E., Sörös, P., Müller, H. H. O., & Philipsen, A. (2018). The Senses of Agency and Ownership : A Review. *Frontiers in Psychology*, *9*, 535. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00535

Brunoni, A. R., Amadera, J., Berbel, B., Volz, M. S., Rizzerio, B. G., & Fregni, F. (2011). A systematic review on reporting and assessment of adverse effects associated with transcranial direct current stimulation. *The International Journal of Neuropsychopharmacology*, *14*(8), 1133-1145. https://doi.org/10.1017/S1461145710001690

Bulot, V., Thomas, P., & Delevoye-Turrell, Y. (2007). Agentivité : Se vivre ou se juger agent? *L'Encéphale*, *33*(4), 603-608. https://doi.org/10.1016/S0013-7006(07)92060-6

Chancel, M., Ehrsson, H. H., & Ma, W. J. (2022). Uncertainty-based inference of a common cause for body ownership. *eLife*, *11*, e77221. https://doi.org/10.7554/eLife.77221

Chang, J.-C., Yen, A. M.-F., Chen, H.-H., Chen, S. L.-S., Chiu, S. Y.-H., Fann, J. C.-Y., & Lee, C.-S. (2017). Comorbid diseases as risk factors for incident posttraumatic stress disorder (PTSD) in a large community cohort (KCIS no.PSY4). *Scientific Reports*, *7*(1), Article 1. https://doi.org/10.1038/srep41276

Chen, Y., Shen, Q., Lichtenstein, P., Gradus, J. L., Arnberg, F. K., Larsson, H., D'Onofrio, B. M., Fang, F., Song, H., & Valdimarsdottir, U. A. (2024). Incidence Trajectories of Psychiatric Disorders After Assault, Injury, and Bereavement. *JAMA Psychiatry*, *81*(4), 374-385. https://doi.org/10.1001/jamapsychiatry.2023.5156

Coimbra, B. M., Hoeboer, C. M., van Zuiden, M., Williamson, R. E., D'Elia, A. T., Mello, A. F., Mello, M. F., & Olff, M. (2023). The relationship between tonic immobility and the development, severity, and course of posttraumatic stress disorder : Systematic and meta-analytic literature review. *Journal of Anxiety Disorders*, *97*, 102730. https://doi.org/10.1016/j.janxdis.2023.102730

Craig, A. D. B. (2009). How do you feel--now? The anterior insula and human awareness. *Nature Reviews. Neuroscience*, *10*(1), 59-70. https://doi.org/10.1038/nrn2555

Creamer, M., McFarlane, A. C., & Burgess, P. (2005). Psychopathology following trauma : The role of subjective experience. *Journal of Affective Disorders*, *86*(2-3), 175-182. https://doi.org/10.1016/j.jad.2005.01.015

Daníelsdóttir, H. B., Aspelund, T., Shen, Q., Halldorsdottir, T., Jakobsdóttir, J., Song, H., Lu, D., Kuja-Halkola, R., Larsson, H., Fall, K., Magnusson, P. K. E., Fang, F., Bergstedt, J., & Valdimarsdóttir, U. A. (2024). Adverse Childhood Experiences and Adult Mental Health Outcomes. *JAMA Psychiatry*, *81*(6), 586-594. https://doi.org/10.1001/jamapsychiatry.2024.0039

Darwin, C. (1929). *The Expression of the Emotions in Man and Animals : And, The Autobiography* (Vol. 1). Library of Alexandria. https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=9oE6E70ukxUC&oi=fnd&pg=PT11&dq=The+expression+of+the+emotions+in+man+and+animals&ots=_HJajS1Xjp&sig=aIcnbKQvVf_wgomLcryhLNgPjz4

Davidson, J. R. T., Connor, K. M., Hertzberg, M. A., Weisler, R. H., Wilson, W. H., & Payne, V. M. (2005). Maintenance therapy with fluoxetine in posttraumatic stress disorder : A placebo-controlled discontinuation study. *Journal of Clinical Psychopharmacology*, *25*(2), 166-169. https://doi.org/10.1097/01.jcp.0000155817.21467.6c

de Boer, D. M. L., Johnston, P. J., Kerr, G., Meinzer, M., & Cleeremans, A. (2020). A causal role for the right angular gyrus in self-location mediated perspective taking. *Scientific Reports*, *10*(1), 19229. https://doi.org/10.1038/s41598-020-76235-7

de Heer, B. A., & Jones, L. C. (2024). Tonic Immobility as a Defensive Trauma Response to Rape : Bridging Public Health and Law. *Violence Against Women*, *30*(12-13), 3111-3139. https://doi.org/10.1177/10778012231174347

de Kleine, R. A., Hagenaars, M. A., & van Minnen, A. (2018). Tonic immobility during re-experiencing the traumatic event in posttraumatic stress disorder. *Psychiatry Research*, *270*, 1105-1109.

https://doi.org/10.1016/j.psychres.2018.06.051

della Gatta, F., Garbarini, F., Puglisi, G., Leonetti, A., Berti, A., & Borroni, P. (2016). Decreased motor cortex excitability mirrors own hand disembodiment during the rubber hand illusion. *eLife*, *5*, e14972. https://doi.org/10.7554/eLife.14972

de Souza Junior, S., Monteiro Fabricio Gama, C., Menezes Gonçalves, R., Lorrany Campos Guerra, T., Volchan, E., Erthal, F. S., Mocaiber, I., de Paula Antunes David, I., Catarina Lima Portugal, L., Mendlowicz, M. V., Berger, W., de Oliveira, L., & Garcia Pereira, M. (2024). Tonic immobility triggered by COVID-19-related trauma is associated with long-term PTSD symptoms. *Journal of Anxiety Disorders*, *105*, 102894. https://doi.org/10.1016/j.janxdis.2024.102894

Dokkedahl, S. B., Charny, S., & Lahav, Y. (2024). Testing previously proposed models of the Tonic Immobility Scale in a peritraumatic sample of Israeli civilians : Support for a three-factor model. *Psychological Trauma: Theory, Research, Practice and Policy*, *16*(1), 21-29. https://doi.org/10.1037/tra0001499

Dunsmoor, J. E., Kroes, M. C. W., Li, J., Daw, N. D., Simpson, H. B., & Phelps, E. A. (2019). Role of Human Ventromedial Prefrontal Cortex in Learning and Recall of Enhanced Extinction. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, *39*(17), 3264-3276. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2713-18.2019

Ehlers, A., & Clark, D. M. (2000). A cognitive model of posttraumatic stress disorder. *Behaviour Research and Therapy*, *38*(4), 319-345. https://doi.org/10.1016/s0005-7967(99)00123-0

Ehrsson, H. H. (2020). Chapter 8—Multisensory processes in body ownership. In K. Sathian & V. S. Ramachandran (Éds.), *Multisensory Perception* (p. 179-200). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812492-5.00008-5

Ehrsson, H. H., Holmes, N. P., & Passingham, R. E. (2005). Touching a Rubber Hand : Feeling of Body Ownership Is Associated with Activity in Multisensory Brain Areas. *Journal of Neuroscience*, *25*(45), 10564-10573. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0800-05.2005

Elwood, L. S., Hahn, K. S., Olatunji, B. O., & Williams, N. L. (2009). Cognitive vulnerabilities to the development of PTSD : A review of four vulnerabilities and the proposal of an integrative vulnerability model. *Clinical Psychology Review*, *29*(1), 87-100. https://doi.org/10.1016/j.cpr.2008.10.002

Engelen, T., Solcà, M., & Tallon-Baudry, C. (2023). Interoceptive rhythms in the brain. *Nature Neuroscience*, *26*(10), 1670-1684. https://doi.org/10.1038/s41593-023-01425-1

Eyraud, N., Poupin, P., Legrand, M., Caille, A., Sauvaget, A., Bulteau, S., Gohier, B., Harika-Germaneau, G., Drapier, D., Jaafari, N., Bodic, O., Brizard, B., Gissot, V., Belzung, C., Courtine, J.-B., & El-Hage, W. (2024). Combining trauma script exposure with tDCS to alleviate symptoms of posttraumatic stress disorder : A two-arm randomized sham-controlled multicenter trial. *Brain Stimulation: Basic, Translational, and Clinical Research in Neuromodulation*, *17*(3), 591-593. https://doi.org/10.1016/j.brs.2024.04.018

Fang, W., Zhang, R., Zhao, Y., Wang, L., & Zhou, Y.-D. (2019). Attenuation of Pain Perception Induced by the Rubber Hand Illusion. *Frontiers in Neuroscience*,

13, 261. https://doi.org/10.3389/fnins.2019.00261

Farrer, C., & Frith, C. D. (2002). Experiencing oneself vs another person as being the cause of an action : The neural correlates of the experience of agency. *NeuroImage*, *15*(3), 596-603. https://doi.org/10.1006/nimg.2001.1009

Faucher, C. R., Doherty, R. A., Philip, N. S., Harle, A. S. M., Cole, J. J. E., & Van't Wout-Frank, M. (2021). Is there a neuroscience-based, mechanistic rationale for transcranial direct current stimulation as an adjunct treatment for posttraumatic stress disorder? *Behavioral Neuroscience*, *135*(6), 702-713. https://doi.org/10.1037/bne0000487

Fernandez, A., Askenazy, F., Zeghari, R., Auby, P., Robert, P., Thümmler, S., & Gindt, M. (2024). Somatic and Posttraumatic Stress Symptoms in Children and Adolescents in France. *JAMA Network Open*, *7*(4), e247193. https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2024.7193

Fertonani, A., & Miniussi, C. (2017). Transcranial Electrical Stimulation : What We Know and Do Not Know About Mechanisms. *The Neuroscientist: A Review Journal Bringing Neurobiology, Neurology and Psychiatry*, *23*(2), 109-123. https://doi.org/10.1177/1073858416631966

Fiszman, A., Mendlowicz, M. V., Marques-Portella, C., Volchan, E., Coutinho, E. S., Souza, W. F., Rocha, V., Lima, A. A., Salomão, F. P., Mari, J. J., & Figueira, I. (2008). Peritraumatic tonic immobility predicts a poor response to pharmacological treatment in victims of urban violence with PTSD. *Journal of Affective Disorders*, *107*(1-3), 193-197. https://doi.org/10.1016/j.jad.2007.07.015

Ford, J. M., & Mathalon, D. H. (2019). Efference Copy, Corollary Discharge, Predictive Coding, and Psychosis. *Biological Psychiatry: Cognitive Neuroscience and Neuroimaging*, *4*(9), 764-767. https://doi.org/10.1016/j.bpsc.2019.07.005

Forsyth, J. P., Marx, B., Fusé, T. M. K., Heidt, J., & Gallup, G. G. (2000). *The Tonic Immobility Scale–Adult Form*. Albany, NY: Authors.

Fragkaki, I., Stins, J., Roelofs, K., Jongedijk, R. A., & Hagenaars, M. A. (2016). Tonic immobility differentiates stress responses in PTSD. *Brain and Behavior*, *6*(11), e00546. https://doi.org/10.1002/brb3.546

Fried, I., Mukamel, R., & Kreiman, G. (2011). Internally generated preactivation of single neurons in human medial frontal cortex predicts volition. *Neuron*, *69*(3), 548-562. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2010.11.045

Friston, K. (2005). A theory of cortical responses. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *360*(1456), 815-836. https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1622

Friston, K. (2011). Embodied inference : Or « I think therefore I am, if I am what I think ». In *The implications of embodiment : Cognition and communication* (p. 89-125). Imprint Academic.

Frith, C. (2012). Explaining delusions of control : The comparator model 20 years on. *Consciousness and Cognition*, *21*(1), 52-54. https://doi.org/10.1016/j.concog.2011.06.010

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

Fusé, T., Forsyth, J. P., Marx, B., Gallup, G. G., & Weaver, S. (2007). Factor

structure of the Tonic Immobility Scale in female sexual assault survivors : An exploratory and Confirmatory Factor Analysis. *Journal of Anxiety Disorders*, *21*(3), 265-283. https://doi.org/10.1016/j.janxdis.2006.05.004

Gallagher, M., Colzi, C., & Sedda, A. (2021). Dissociation of proprioceptive drift and feelings of ownership in the somatic rubber hand illusion. *Acta Psychologica*, *212*, 103192. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2020.103192

Gallagher, S. (2000). Philosophical conceptions of the self : Implications for cognitive science. *Trends in Cognitive Sciences*, *4*(1), 14-21. https://doi.org/10.1016/S1364-6613(99)01417-5

Galliano, G., Noble, L. M., Travis, L. A., & Puechl, C. (1993). Victim Reactions During Rape/Sexual Assault : A Preliminary Study of the Immobility Response and Its Correlates. *Journal of Interpersonal Violence*, *8*(1), 109-114. https://doi.org/10.1177/088626093008001008

Hagenaars, M. A. (2016). Tonic immobility and PTSD in a large community sample. *Journal of Experimental Psychopathology*, *7*(2), 246-260. https://doi.org/10.5127/jep.051915

Hagenaars, M. A., Oitzl, M., & Roelofs, K. (2014). Updating freeze : Aligning animal and human research. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *47*, 165-176. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2014.07.021

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

Haggard, P., Clark, S., & Kalogeras, J. (2002). Voluntary action and conscious awareness. *Nature Neuroscience*, *5*(4), 382-385. https://doi.org/10.1038/nn827

Haute Autorité de Santé. (2017). *Troubles anxieux graves*. https://www.has-sante.fr/upload/docs/application/pdf/liste_ald_troubles_anxieux.pdf

Hidaka, S., Sasaki, K., Kawagoe, T., Asai, N., & Teramoto, W. (2021). Bodily ownership and agency sensations in a natural state. *Scientific Reports*, *11*(1), 8651. https://doi.org/10.1038/s41598-021-87843-2

Huggins, A. A., Baird, C. L., Briggs, M., Laskowitz, S., Hussain, A., Fouda, S., Haswell, C., Sun, D., Salminen, L. E., Jahanshad, N., Thomopoulos, S. I., Veltman, D. J., Frijling, J. L., Olff, M., van Zuiden, M., Koch, S. B. J., Nawjin, L., Wang, L., Zhu, Y., … Morey, R. (2024). Smaller total and subregional cerebellar volumes in posttraumatic stress disorder : A mega-analysis by the ENIGMA-PGC PTSD workgroup. *Molecular Psychiatry*, *29*(3), 611-623. https://doi.org/10.1038/s41380-023-02352-0

Jardri, R., & Thomas, P. (2009). Les troubles de la distinction Soi-Autre chez les sujets souffrant de schizophrénie : Perspectives neuroscientifiques. *L'information psychiatrique*, *85*(5), 415-419. https://doi.org/10.3917/inpsy.8505.0415

Kalckert, A., & Ehrsson, H. H. (2012). Moving a Rubber Hand that Feels Like Your Own : A Dissociation of Ownership and Agency. *Frontiers in Human Neuroscience*, *6*, 40. https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00040

Kalckert, A., & Ehrsson, H. H. (2014). The moving rubber hand illusion revisited : Comparing movements and visuotactile stimulation to induce illusory ownership. *Consciousness and Cognition*, *26*, 117-132. https://doi.org/10.1016/j.concog.2014.02.003

Kalckert, A., & Ehrsson, H. H. (2017). The Onset Time of the Ownership Sensation in the Moving Rubber Hand Illusion. *Frontiers in Psychology*, *8*, 344.

https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00344

Kanai, R., Komura, Y., Shipp, S., & Friston, K. (2015). Cerebral hierarchies : Predictive processing, precision and the pulvinar. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, *370*(1668), 20140169. https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0169

Karam, E. G., Friedman, M. J., Hill, E. D., Kessler, R. C., McLaughlin, K. A., Petukhova, M., Sampson, L., Shahly, V., Angermeyer, M. C., Bromet, E. J., de Girolamo, G., de Graaf, R., Demyttenaere, K., Ferry, F., Florescu, S. E., Haro, J. M., He, Y., Karam, A. N., Kawakami, N., … Koenen, K. C. (2014). Cumulative traumas and risk thresholds : 12-month PTSD in the World Mental Health (WMH) surveys. *Depression and Anxiety*, *31*(2), 130-142. https://doi.org/10.1002/da.22169

Katzman, M. A., Bleau, P., Blier, P., Chokka, P., Kjernisted, K., Van Ameringen, M., & the Canadian Anxiety Guidelines Initiative Group on behalf of the Anxiety Disorders Association of Canada/Association Canadienne des troubles anxieux and McGill University. (2014). Canadian clinical practice guidelines for the management of anxiety, posttraumatic stress and obsessive-compulsive disorders. *BMC Psychiatry*, *14*(Suppl 1), S1. https://doi.org/10.1186/1471-244X-14-S1-S1

Kessler, R. C., Avenevoli, S., Costello, J., Green, J. G., Gruber, M. J., McLaughlin, K. A., Petukhova, M., Sampson, N. A., Zaslavsky, A. M., & Merikangas, K. R. (2012). Severity of 12-month DSM-IV disorders in the National Comorbidity Survey Replication Adolescent Supplement. *Archives of General Psychiatry*, *69*(4), 381-389. https://doi.org/10.1001/archgenpsychiatry.2011.1603

Kessler, R. C., Sonnega, A., Bromet, E., Hughes, M., & Nelson, C. B. (1995). Posttraumatic stress disorder in the National Comorbidity Survey. *Archives of General Psychiatry*, *52*(12), 1048-1060. https://doi.org/10.1001/archpsyc.1995.03950240066012

Khalighinejad, N., Di Costa, S., & Haggard, P. (2016). Endogenous Action Selection Processes in Dorsolateral Prefrontal Cortex Contribute to Sense of Agency : A Meta-Analysis of tDCS Studies of 'Intentional Binding'. *Brain Stimulation*, *9*(3), 372-379. https://doi.org/10.1016/j.brs.2016.01.005

Khalighinejad, N., & Haggard, P. (2015). Modulating human sense of agency with non-invasive brain stimulation. *Cortex*, *69*, 93-103. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.04.015

Kilteni, K., & Ehrsson, H. H. (2017). Body ownership determines the attenuation of self-generated tactile sensations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *114*(31), 8426-8431. https://doi.org/10.1073/pnas.1703347114

Kilteni, K., & Ehrsson, H. H. (2024). Dynamic changes in somatosensory and cerebellar activity mediate temporal recalibration of self-touch. *Communications Biology*, *7*(1), 1-15. https://doi.org/10.1038/s42003-024-06188-4

Knill, D. C., & Pouget, A. (2004). The Bayesian brain : The role of uncertainty in neural coding and computation. *Trends in Neurosciences*, *27*(12), 712-719. https://doi.org/10.1016/j.tins.2004.10.007

Koenen, K. C., Ratanatharathorn, A., Ng, L., McLaughlin, K. A., Bromet, E. J., Stein, D. J., Karam, E. G., Meron Ruscio, A., Benjet, C., Scott, K., Atwoli, L.,

Petukhova, M., Lim, C. C. W., Aguilar-Gaxiola, S., Al-Hamzawi, A., Alonso, J., Bunting, B., Ciutan, M., de Girolamo, G., … Kessler, R. C. (2017). Posttraumatic stress disorder in the World Mental Health Surveys. *Psychological Medicine*, *47*(13), 2260-2274. https://doi.org/10.1017/S0033291717000708

Körding, K. P., Beierholm, U., Ma, W. J., Quartz, S., Tenenbaum, J. B., & Shams, L. (2007). Causal Inference in Multisensory Perception. *PLOS ONE*, *2*(9), e943. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0000943

Köster, M., Kayhan, E., Langeloh, M., & Hoehl, S. (2020). Making Sense of the World : Infant Learning From a Predictive Processing Perspective. *Perspectives on Psychological Science: A Journal of the Association for Psychological Science*, *15*(3), 562-571. https://doi.org/10.1177/1745691619895071

Kozlowska, K., Walker, P., McLean, L., & Carrive, P. (2015). Fear and the Defense Cascade : Clinical Implications and Management. *Harvard Review of Psychiatry*, *23*(4), 263-287. https://doi.org/10.1097/HRP.0000000000000065

Kube, T., Berg, M., Kleim, B., & Herzog, P. (2020). Rethinking post-traumatic stress disorder—A predictive processing perspective. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *113*, 448-460. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2020.04.014

Kube, T., & Rozenkrantz, L. (2021). When Beliefs Face Reality : An Integrative Review of Belief Updating in Mental Health and Illness. *Perspectives on Psychological Science: A Journal of the Association for Psychological Science*, *16*(2), 247-274. https://doi.org/10.1177/1745691620931496

Kuo, M.-F., Paulus, W., & Nitsche, M. A. (2014). Therapeutic effects of non-invasive brain stimulation with direct currents (tDCS) in neuropsychiatric diseases. *NeuroImage*, *85 Pt 3*, 948-960. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.05.117

Lanius, R. A., Frewen, P. A., Girotti, M., Neufeld, R. W. J., Stevens, T. K., & Densmore, M. (2007). Neural correlates of trauma script-imagery in posttraumatic stress disorder with and without comorbid major depression : A functional MRI investigation. *Psychiatry Research*, *155*(1), 45-56. https://doi.org/10.1016/j.pscychresns.2006.11.006

Laurin, A., Nard, N., Dalmont, M., Bulteau, S., Bénard, C., Bonnot, O., Winer, N., Dupont, F., Apter, G., Terranova-Commessie, F., Guillin, O., El-Hage, W., Sauvaget, A., & Rothärmel, M. (2022). Efficacy and Safety of Transcranial Electric Stimulation during the Perinatal Period : A Systematic Literature Review and Three Case Reports. *Journal of Clinical Medicine*, *11*(14), Article 14. https://doi.org/10.3390/jcm11144048

Lebigot, François. (2000). *La clinique de la névrose traumatique dans son rapport à l'évènement. 1*(1), 21-25.

Litwin, P. (2020). Extending Bayesian Models of the Rubber Hand Illusion. *Multisensory Research*, *33*(2), 127-160. https://doi.org/10.1163/22134808-20191440

Liu, H., Wang, X., Gong, T., Xu, S., Zhang, J., Yan, L., Zeng, Y., Yi, M., & Qian, Y. (2024). Neuromodulation treatments for post-traumatic stress disorder : A systematic review and network meta-analysis covering efficacy, acceptability, and follow-up effects. *Journal of Anxiety Disorders*, *106*, 102912. https://doi.org/10.1016/j.janxdis.2024.102912

Lloyd, D. M. (2007). Spatial limits on referred touch to an alien limb may reflect boundaries of visuo-tactile peripersonal space surrounding the hand. *Brain and Cognition*, *64*(1), 104-109. https://doi.org/10.1016/j.bandc.2006.09.013

Longo, M. R., Schüür, F., Kammers, M. P. M., Tsakiris, M., & Haggard, P. (2008). What is embodiment? A psychometric approach. *Cognition*, *107*(3), 978-998. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2007.12.004

Lopez, G., Colle, D., CATTIN, J.-M., & Diamant-Berger, O. (1992). Conséquences psychologiques des agressions avec pénétrations sexuelles. Enquête épidémiologique des UMJ-Paris (436 questionnaires). *Psychologie médicale*, *24*(5), 447-451.

Louis Crocq. (1999). *Traumatismes psychiques de guerre*. Odile Jacob.

Lukas, E., Veeneman, R. R., Smit, D. J., Vermeulen, J. M., Pathak, G. A., Polimanti, R., Verweij, K. J., & Treur, J. L. (2024). A genetic exploration of the relationship between Posttraumatic Stress Disorder and cardiovascular diseases. *medRxiv*, 2024.03.20.24304533. https://doi.org/10.1101/2024.03.20.24304533

Mahan, A. L., & Ressler, K. J. (2012). Fear conditioning, synaptic plasticity and the amygdala : Implications for posttraumatic stress disorder. *Trends in Neurosciences*, *35*(1), 24-35. https://doi.org/10.1016/j.tins.2011.06.007

Maia, D. B., Nóbrega, A., Marques-Portella, C., Mendlowicz, M. V., Volchan, E., Coutinho, E. S., & Figueira, I. (2015). Peritraumatic tonic immobility is associated with PTSD symptom severity in Brazilian police officers : A prospective study. *Revista Brasileira De Psiquiatria (Sao Paulo, Brazil: 1999)*, *37*(1), 49-54. https://doi.org/10.1590/1516-4446-2013-1267

Manocchio, F., Enepekides, J., Nestor, S., Giacobbe, P., Rabin, J. S., Burke, M. J., Lanctôt, K. L., Goubran, M., Meng, Y., Lipsman, N., Hamani, C., & Davidson, B. (2025). Neuromodulation as a therapeutic approach for post-traumatic stress disorder : The evidence to date. *Expert Review of Neurotherapeutics*, *25*(1), 101-120. https://doi.org/10.1080/14737175.2024.2442658

Matsumoto, N., Nakai, R., Ino, T., & Mitani, A. (2020). Brain activity associated with the rubber foot illusion. *Neuroscience Letters*, *721*, 134820. https://doi.org/10.1016/j.neulet.2020.134820

Mengin, A. (2023). Naissance et évolution du concept de trauma complexe. In *Le grand livre du trauma complexe* (Dunod, p. 15-31). Dunod.

Milad, M. R., Quirk, G. J., Pitman, R. K., Orr, S. P., Fischl, B., & Rauch, S. L. (2007). A role for the human dorsal anterior cingulate cortex in fear expression. *Biological Psychiatry*, *62*(10), 1191-1194. https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2007.04.032

Milev, R. V., Giacobbe, P., Kennedy, S. H., Blumberger, D. M., Daskalakis, Z. J., Downar, J., Modirrousta, M., Patry, S., Vila-Rodriguez, F., Lam, R. W., MacQueen, G. M., Parikh, S. V., Ravindran, A. V., & CANMAT Depression Work Group. (2016). Canadian Network for Mood and Anxiety Treatments (CANMAT) 2016 Clinical Guidelines for the Management of Adults with Major Depressive Disorder : Section 4. Neurostimulation Treatments. *Canadian Journal of Psychiatry. Revue Canadienne De Psychiatrie*, *61*(9), 561-575. https://doi.org/10.1177/0706743716660033

Monai, H., & Hirase, H. (2018). Astrocytes as a target of transcranial direct current stimulation (tDCS) to treat depression. *Neuroscience Research*, *126*, 15-21. https://doi.org/10.1016/j.neures.2017.08.012

Montague, P. R., Dolan, R. J., Friston, K. J., & Dayan, P. (2012). Computational psychiatry. *Trends in Cognitive Sciences*, *16*(1), 72-80. https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.11.018

Moore, J. W. (2016). What is the sense of agency and why does it matter? *Frontiers in psychology*, *7*, 209433.

Moore, J. W., & Fletcher, P. C. (2012). Sense of agency in health and disease : A review of cue integration approaches. *Consciousness and Cognition*, *21*(1), 59-68. https://doi.org/10.1016/j.concog.2011.08.010

Müller, M., Vandeleur, C., Rodgers, S., Rössler, W., Castelao, E., Preisig, M., & Ajdacic-Gross, V. (2014). Factors associated with comorbidity patterns in full and partial PTSD : Findings from the PsyCoLaus study. *Comprehensive Psychiatry*, *55*(4), 837-848. https://doi.org/10.1016/j.comppsych.2014.01.009

National Institute for Health and Care Excellence. (2018). *Post-traumatic stress disorder (PTSD)—NICE Guidelines*. London: Author. https://www.staffordshireconnects.info/kb5/staffordshire/directory/document.page?id=XuH7R2XyOnI

Nicholson, A. A., Harricharan, S., Densmore, M., Neufeld, R. W. J., Ros, T., McKinnon, M. C., Frewen, P. A., Théberge, J., Jetly, R., Pedlar, D., & Lanius, R. A. (2020). Classifying heterogeneous presentations of PTSD via the default mode, central executive, and salience networks with machine learning. *NeuroImage: Clinical*, *27*, 102262. https://doi.org/10.1016/j.nicl.2020.102262

Nicholson, A. A., McKinnon, M. C., Jetly, R., & Lanius, R. A. (2020). Uncovering the heterogeneity of posttraumatic stress disorder : Towards a personalized medicine approach for military members and Veterans. *Journal of Military, Veteran and Family Health*, *6*(S1), 68-79. https://doi.org/10.3138/jmvfh.2019-0031

Nikolin, S., Huggins, C., Martin, D., Alonzo, A., & Loo, C. K. (2018). Safety of repeated sessions of transcranial direct current stimulation : A systematic review. *Brain Stimulation*, *11*(2), 278-288. https://doi.org/10.1016/j.brs.2017.10.020

Nitsche, M. A., Seeber, A., Frommann, K., Klein, C. C., Rochford, C., Nitsche, M. S., Fricke, K., Liebetanz, D., Lang, N., Antal, A., Paulus, W., & Tergau, F. (2005). Modulating parameters of excitability during and after transcranial direct current stimulation of the human motor cortex. *The Journal of Physiology*, *568*(Pt 1), 291-303. https://doi.org/10.1113/jphysiol.2005.092429

Northoff, G., Buccellato, A., & Ventura, B. (2025). The Default Mode Network and inner time consciousness. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, *63*, 101524. https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2025.101524

Obuobi-Donkor, G., Oluwasina, F., Nkire, N., & Agyapong, V. I. O. (2022). A Scoping Review on the Prevalence and Determinants of Post-Traumatic Stress Disorder among Military Personnel and Firefighters : Implications for Public Policy and Practice. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(3), Article 3. https://doi.org/10.3390/ijerph19031565

O'Kane, S. H., Chancel, M., & Ehrsson, H. H. (2024). Hierarchical and dynamic relationships between body part ownership and full-body ownership. *Cognition*, *246*, 105697. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2023.105697

Paulus, M. P., Feinstein, J. S., & Khalsa, S. S. (2019). An Active Inference Approach to Interoceptive Psychopathology. *Annual Review of Clinical Psychology*, *15*,

97-122. https://doi.org/10.1146/annurev-clinpsy-050718-095617

Phelps, E. A., Delgado, M. R., Nearing, K. I., & LeDoux, J. E. (2004). Extinction learning in humans : Role of the amygdala and vmPFC. *Neuron*, *43*(6), 897-905. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2004.08.042

Pivac, N., Vuic, B., Sagud, M., Nedic Erjavec, G., Nikolac Perkovic, M., Konjevod, M., Tudor, L., Svob Strac, D., Uzun, S., Kozumplik, O., Uzun, S., & Mimica, N. (2023). PTSD, Immune System, and Inflammation. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, *1411*, 225-262. https://doi.org/10.1007/978-981-19-7376-5_11

Portugal, L. C. L., Pereira, M. G., Alves, R. de C. S., Tavares, G., Lobo, I., Rocha-Rego, V., Marques-Portella, C., Mendlowicz, M. V., Coutinho, E. S., Fiszman, A., Volchan, E., Figueira, I., & Oliveira, L. de. (2012). Peritraumatic tonic immobility is associated with posttraumatic stress symptoms in undergraduate Brazilian students. *Revista Brasileira De Psiquiatria (Sao Paulo, Brazil: 1999)*, *34*(1), 60-65. https://doi.org/10.1590/s1516-44462012000100011

Pyasik, M., Burin, D., & Pia, L. (2018). On the relation between body ownership and sense of agency : A link at the level of sensory-related signals. *Acta Psychologica*, *185*, 219-228. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2018.03.001

Rabellino, D., Burin, D., Harricharan, S., Lloyd, C., Frewen, P. A., McKinnon, M. C., & Lanius, R. A. (2018). Altered Sense of Body Ownership and Agency in Posttraumatic Stress Disorder and Its Dissociative Subtype : A Rubber Hand Illusion Study. *Frontiers in Human Neuroscience*, *12*, 163. https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00163

Ramakonar, H., Franz, E. A., & Lind, C. R. P. (2011). The rubber hand illusion and its application to clinical neuroscience. *Journal of Clinical Neuroscience: Official Journal of the Neurosurgical Society of Australasia*, *18*(12), 1596-1601. https://doi.org/10.1016/j.jocn.2011.05.008

Rehman, I., Mahabadi, N., Sanvictores, T., & Rehman, C. I. (2025). Classical Conditioning. In *StatPearls*. StatPearls Publishing. http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK470326/

Riemer, M., Trojan, J., Beauchamp, M., & Fuchs, X. (2019). The rubber hand universe : On the impact of methodological differences in the rubber hand illusion. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *104*, 268-280. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2019.07.008

Rocha-Rego, V., Fiszman, A., Portugal, L. C., Garcia Pereira, M., de Oliveira, L., Mendlowicz, M. V., Marques-Portella, C., Berger, W., Freire Coutinho, E. S., Mari, J. J., Figueira, I., & Volchan, E. (2009). Is tonic immobility the core sign among conventional peritraumatic signs and symptoms listed for PTSD? *Journal of Affective Disorders*, *115*(1-2), 269-273. https://doi.org/10.1016/j.jad.2008.09.005

Roelofs, K. (2017). Freeze for action : Neurobiological mechanisms in animal and human freezing. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *372*(1718), 20160206. https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0206

Ross, M. C., & Cisler, J. M. (2020). Altered large-scale functional brain organization in posttraumatic stress disorder : A comprehensive review of univariate and network-level neurocircuitry models of PTSD. *NeuroImage: Clinical*, *27*, 102319. https://doi.org/10.1016/j.nicl.2020.102319

Rowe, J. B., Hughes, L., & Nimmo-Smith, I. (2010). Action selection : A race model

for selected and non-selected actions distinguishes the contribution of premotor and prefrontal areas. *NeuroImage*, *51*(2), 888-896. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.02.045

Rudroff, T., Workman, C. D., Fietsam, A. C., & Kamholz, J. (2020). Response Variability in Transcranial Direct Current Stimulation : Why Sex Matters. *Frontiers in Psychiatry*, *11*. https://doi.org/10.3389/fpsyt.2020.00585

Ruiz, C., & Kurkdjian, L. (2007). La santé mentale en population générale : images et réalités. Premiers résultats en région PACA. *L'information psychiatrique*, *83*(10), 821-826. https://doi.org/10.1684/ipe.2007.0261

Sakai, M. (2021). Freezing and Tonic Immobility : Their Definitions and Naming. In M. Sakai (Éd.), *Death-Feigning in Insects : Mechanism and Function of Tonic Immobility* (p. 1-14). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6598-8_1

Samad, M., Chung, A. J., & Shams, L. (2015). Perception of body ownership is driven by Bayesian sensory inference. *PloS One*, *10*(2), e0117178. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0117178

Seghezzi, S., Giannini, G., & Zapparoli, L. (2019). Neurofunctional correlates of body-ownership and sense of agency : A meta-analytical account of self-consciousness. *Cortex*, *121*, 169-178. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2019.08.018

Shimada, S., Suzuki, T., Yoda, N., & Hayashi, T. (2014). Relationship between sensitivity to visuotactile temporal discrepancy and the rubber hand illusion. *Neuroscience Research*, *85*, 33-38. https://doi.org/10.1016/j.neures.2014.04.009

Shin, Y.-I., Foerster, Á., & Nitsche, M. A. (2015). Transcranial direct current stimulation (tDCS)—Application in neuropsychology. *Neuropsychologia*, *69*, 154-175. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.02.002

Sierra, M., & Berrios, G. E. (1998). Depersonalization : Neurobiological perspectives. *Biological Psychiatry*, *44*(9), 898-908. https://doi.org/10.1016/s0006-3223(98)00015-8

Skinner, B. F. (1971). Operant conditioning. *The encyclopedia of education*, *7*, 29-33.

Smits, F. M., Geuze, E., Schutter, D. J., van Honk, J., & Gladwin, T. E. (2022). Effects of tDCS during inhibitory control training on performance and PTSD, aggression and anxiety symptoms : A randomized-controlled trial in a military sample. *Psychological medicine*, *52*(16), 3964-3974.

Sperduti, M., Delaveau, P., Fossati, P., & Nadel, J. (2011). Different brain structures related to self- and external-agency attribution : A brief review and meta-analysis. *Brain Structure & Function*, *216*(2), 151-157. https://doi.org/10.1007/s00429-010-0298-1

Stein, M. B., Kline, N. A., & Matloff, J. L. (2002). Adjunctive olanzapine for SSRI-resistant combat-related PTSD : A double-blind, placebo-controlled study. *The American Journal of Psychiatry*, *159*(10), 1777-1779. https://doi.org/10.1176/appi.ajp.159.10.1777

Stephan, K. E., & Mathys, C. (2014). Computational approaches to psychiatry. *Current Opinion in Neurobiology*, *25*, 85-92. https://doi.org/10.1016/j.conb.2013.12.007

Suarez, S. D., & Gallup, G. G. (1979). Tonic Immobility as a Response to Rape in

Humans a Theoretical Note. *The Psychological Record*, *29*(3), 315-320. https://doi.org/10.1007/BF03394619

Suzuki, K., Garfinkel, S. N., Critchley, H. D., & Seth, A. K. (2013). Multisensory integration across exteroceptive and interoceptive domains modulates self-experience in the rubber-hand illusion. *Neuropsychologia*, *51*(13), 2909-2917. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2013.08.014

Synofzik, M., Vosgerau, G., & Newen, A. (2008). Beyond the comparator model : A multifactorial two-step account of agency. *Consciousness and cognition*, *17*(1), 219-239. https://doi.org/10.1016/j.concog.2007.03.010

Tsakiris, M., Carpenter, L., James, D., & Fotopoulou, A. (2010). Hands only illusion : Multisensory integration elicits sense of ownership for body parts but not for non-corporeal objects. *Experimental brain research*, *204*, 343-352.

Utz, K. S., Dimova, V., Oppenländer, K., & Kerkhoff, G. (2010). Electrified minds : Transcranial direct current stimulation (tDCS) and galvanic vestibular stimulation (GVS) as methods of non-invasive brain stimulation in neuropsychology--a review of current data and future implications. *Neuropsychologia*, *48*(10), 2789-2810. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.06.002

van 't Wout-Frank, M., Arulpragasam, A. R., Faucher, C., Aiken, E., Shea, M. T., Jones, R. N., Greenberg, B. D., & Philip, N. S. (2024). Virtual Reality and Transcranial Direct Current Stimulation for Posttraumatic Stress Disorder : A Randomized Clinical Trial. *JAMA Psychiatry*, *81*(5), 437-446. https://doi.org/10.1001/jamapsychiatry.2023.5661

van 't Wout-Frank, M., Shea, M. T., Larson, V. C., Greenberg, B. D., & Philip, N. S. (2019). Combined transcranial direct current stimulation with virtual reality exposure for posttraumatic stress disorder : Feasibility and pilot results. *Brain Stimulation*, *12*(1), 41-43. https://doi.org/10.1016/j.brs.2018.09.011

Van't Wout, M., Longo, S. M., Reddy, M. K., Philip, N. S., Bowker, M. T., & Greenberg, B. D. (2017). Transcranial direct current stimulation may modulate extinction memory in posttraumatic stress disorder. *Brain and Behavior*, *7*(5), e00681. https://doi.org/10.1002/brb3.681

Wang, J., Yao, X., Ji, Y., & Li, H. (2024). Cognitive potency and safety of tDCS treatment for major depressive disorder : A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Human Neuroscience*, *18*. https://doi.org/10.3389/fnhum.2024.1458295

Wegner, D. M. (2017). *The Illusion of Conscious Will, New Edition*. MIT Press.

Wegner, D. M., & Wheatley, T. (1999). Apparent mental causation : Sources of the experience of will. *American Psychologist*, *54*(7), 480-492. https://doi.org/10.1037/0003-066X.54.7.480

Welniarz, Q., Worbe, Y., & Gallea, C. (2021). The Forward Model : A Unifying Theory for the Role of the Cerebellum in Motor Control and Sense of Agency. *Frontiers in Systems Neuroscience*, *15*. https://doi.org/10.3389/fnsys.2021.644059

White, W. F., Burgess, A., Dalgleish, T., Halligan, S., Hiller, R., Oxley, A., Smith, P., & Meiser-Stedman, R. (2022). Prevalence of the dissociative subtype of post-traumatic stress disorder : A systematic review and meta-analysis. *Psychological Medicine*, *52*(9), 1629-1644. https://doi.org/10.1017/S0033291722001647

WHO. (2022). *ICD-11 2022 release*. https://www.who.int/news/item/11-02-2022-icd-11-2022-release

Xie, L., Hu, P., Guo, Z., Chen, M., Wang, X., Du, X., Li, Y., Chen, B., Zhang, J., Zhao, W., & Liu, S. (2024). Immediate and long-term efficacy of transcranial direct current stimulation (tCDS) in obsessive-compulsive disorder, posttraumatic stress disorder and anxiety disorders : A systematic review and meta-analysis. *Translational Psychiatry*, *14*(1), 343. https://doi.org/10.1038/s41398-024-03053-0

Yamada, Y., & Sumiyoshi, T. (2021). Neurobiological Mechanisms of Transcranial Direct Current Stimulation for Psychiatric Disorders; Neurophysiological, Chemical, and Anatomical Considerations. *Frontiers in Human Neuroscience*, *15*. https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.631838

Yang, X., Ma, L., Fan, C., Wang, H., Zhang, M., Du, H., Zhou, T., & Li, X. (2025). Efficacy and acceptability of brain stimulation for anxiety disorders, OCD, and PTSD : A systematic review and network meta-analysis of randomized controlled trials. *Journal of Affective Disorders*, *370*, 62-75. https://doi.org/10.1016/j.jad.2024.10.071

Yehuda, R., Hoge, C. W., McFarlane, A. C., Vermetten, E., Lanius, R. A., Nievergelt, C. M., Hobfoll, S. E., Koenen, K. C., Neylan, T. C., & Hyman, S. E. (2015). Post-traumatic stress disorder. *Nature Reviews. Disease Primers*, *1*, 15057. https://doi.org/10.1038/nrdp.2015.57

Zeller, D., Friston, K. J., & Classen, J. (2016). Dynamic causal modeling of touch-evoked potentials in the rubber hand illusion. *NeuroImage*, *138*, 266-273. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.05.065

Zheng, E. Z., Wong, N. M. L., Yang, A. S. Y., & Lee, T. M. C. (2024). Evaluating the effects of tDCS on depressive and anxiety symptoms from a transdiagnostic perspective : A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Translational Psychiatry*, *14*(1), 1-15. https://doi.org/10.1038/s41398-024-03003-w

Zito, G. A., Wiest, R., & Aybek, S. (2020). Neural correlates of sense of agency in motor control : A neuroimaging meta-analysis. *PLOS ONE*, *15*(6), e0234321. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0234321

PARTIE 2 :
VERS UN MODÈLE DIMENSIONNEL

Vers un modèle dimensionnel des anomalies de la conscience du corps dans le trouble de stress post-traumatique et son sous-type dissociatif : une approche basée sur la théorie prédictive

Toward dimensional body consciousness impairments in post-traumatic stress disorder and its dissociative subtype: a predictive processing approach

Andrew Laurin [a], Hugo Bottemanne [b,c], Samuel Bulteau [d], Mohamad El Haj [e], Anne Sauvaget [a]& Thibault Deschamps [f]

a. Nantes Université, CHU Nantes, Movement - Interactions - Performance, MIP, UR 4334, F-44000 Nantes, France
b. Department of Psychiatry, Bicêtre Hospital, Mood Center Paris Saclay, DMU Neurosciences, Paris-Saclay University, Assistance Publique-Hôpitaux de Paris (AP-HP), Kremlin-Bicêtre, France.
c. MOODS Team, INSERM 1018, CESP (Centre de Recherche en Epidémiologie et Santé des Populations), Université Paris-Saclay, Faculté de Médecine Paris-Saclay, Kremlin Bicêtre, France
d. Nantes Université, CHU Nantes, INSERM, MethodS in Patients-centered outcomes and HEalth Research, SPHERE F-44000 Nantes, France
e. Nantes Université, Laboratoire de psychologie des Pays de la Loire, LPPL, UR 4638, F-44000 Nantes, France
f. Nantes Université, Movement - Interactions - Performance, MIP, UR 4334, F-44000 Nantes, France

Mots clés : Trouble de stress post-traumatique ; Dissociation ; Agentivité ; Propriété du corps ; Prédiction ; Psychiatrie computationnelle

RÉSUMÉ

Les modèles actuels du trouble de stress post-traumatique (TSPT) se concentrent principalement sur la dérégulation émotionnelle, les comportements d'évitement et les symptômes intrusifs, accordant peu d'attention aux troubles de la conscience du corps. En effet, ces modèles ne tiennent pas pleinement compte de la manière dont un psychotraumatisme peut perturber l'intégration des signaux intéroceptifs et extéroceptifs qui sous-tendent le sentiment d'identité corporelle. S'appuyant sur les progrès récents en psychiatrie computationnelle, cette revue présente un nouveau cadre théorique qui différencie les formes dissociatives et non dissociatives du TSPT

à l'aide de la théorie prédictive. La conscience du corps, qui inclue le sens de propriété du corps (SBO) et le sens de l'agentivité (SoA), s'inscrit dans un cadre d'inférence bayésienne où la perception résulte de l'interaction entre les croyances antérieures et les informations sensorielles entrantes. Dans le TSPT non dissociatif, nous suggérons que des croyances hyperprécises liées au psychotraumatisme, associées à une pondération intéroceptive accrue en lien avec l'hyperactivité de l'amygdale et de l'insula antérieure, entraînent des représentations rigides de soi avec une capacité réduite à mettre à jour la perception corporelle. Ainsi, nous pouvons considérer le TSPT comme un état dans lequel la précision et la fiabilité des processus cognitifs sont hiérarchisés comme suit : Croyances > Intéroception > Extéroception. À l'inverse, dans le sous-type dissociatif du TSPT, la sur-inhibition émotionnelle et l'hypoactivité de l'insula antérieure affaiblissent les croyances antérieures et l'intéroception, tandis que les entrées extéroceptives sont renforcées. Par conséquent, nous considérons que les processus cognitifs dans le sous-type dissociatif du TSPT sont hiérarchisés de la manière suivante : Extéroception > Intéroception > Croyances. Les atteintes du SoA sont spécifiques au TSPT de sous-type dissociatif impliquant une hyperactivité du gyrus angulaire et une hypo-fonction glutamatergique. Fort de ces éléments, nous proposons un modèle dimensionnel original des anomalies de la conscience du corps à travers le spectre du TSPT. Les implications thérapeutiques sont explorées, y compris les interventions descendantes et ascendantes.

---

1. Introduction

Le trouble de stress post-traumatique (TSPT) est un trouble mental courant et invalidant qui survient après avoir été exposé - directement ou en tant que témoin - à un événement traumatique qui se définit comme étant un événement menaçant, exposant à la mort réelle ou à des menaces de mort, à des blessures graves et à des violences sexuelles (American Psychiatric Association, 2013). Bien que trois grands types d'événements traumatiques majeurs soient répertoriés (catastrophes naturelles, incidents d'origine humaine, accidents technologiques) (Ursano et al., 2017), ces événements ne sont pas absolument traumatiques (Cougle et al., 2012), d'où la notion d'un « *événement potentiellement traumatique* ». En effet, la portée traumatique d'un événement est toujours subjective et dépend des expériences passées vécues par l'individu (Creamer et al., 2005), telles que les antécédents traumatiques, les expériences négatives vécues pendant l'enfance ou les facteurs de résilience impliqués (Fleurkens, 2021). Le TSPT est donc conçu comme un trouble mental résultant d'une conjonction singulière entre un événement traumatique et un individu (Borenstein, 2016). On estime que 21% à 90% des personnes ont été exposées à au moins un événement perçu comme traumatique au cours de leur vie (Boudoukha, 2020) mais la prévalence du TSPT est beaucoup plus faible estimée à environ 2,6 % chez les civils français (Sareen, 2014) et 4 à 6% dans le monde (Koenen et al., 2017).

Il n'existe donc pas de relation causale absolue entre l'exposition à un événement potentiellement traumatique et le développement ultérieur d'un TSPT. Sur cette base, il est bien reconnu que l'étiologie précise du TSPT doit être clarifiée davantage afin de

comprendre pourquoi, après avoir été exposées au même événement potentiellement traumatique, certaines personnes développent un TSPT tandis que d'autres n'en développent pas (Galatzer-Levy et al., 2018). Concernant le diagnostic, les critères cliniques du TSPT se caractérisent par la présence persistante (≥ 4 semaines) et invalidante de quatre types de groupes de symptômes : (i) symptômes d'intrusion (souvenirs perturbants indésirables, cauchemars, flashbacks, réactions de peur liées à l'événement traumatisant) ; (ii) comportements d'évitement (évitement des stimuli liés au traumatisme) ; (iii) troubles cognitifs et l'humeur négative (amnésie, pensées négatives sur soi-même ou sur le monde, culpabilisation de soi-même ou des autres pour avoir causé le traumatisme, affect négatif, perte d'intérêt, sentiment d'isolement, difficulté à éprouver des affects positifs) ; (iv) symptômes d'hypervigilance (troubles du sommeil et de l'attention, hypervigilance, réactions de sursaut, agressivité, irritabilité, comportement autodestructeur) (American Psychiatric Association, 2013). Le sous-type dissociatif du TSPT est associé quant à lui à une sensation grave et fréquente de détachement de son propre corps ou de ses processus mentaux, au sentiment d'être un étranger et/ou un observateur extérieur de son propre corps (dépersonnalisation) et/ou à une sensation de détachement de son environnement, perçu comme distant, comme dans un rêve (déréalisation) (American Psychiatric Association, 2013).

Le traitement du TSPT repose d'abord sur des psychothérapies centrées sur le traumatisme, puis sur des antidépresseurs (NICE, 2018 ; Royal College of Psychiatrists, 2023). Des traitements rapides et efficaces visent principalement à éviter l'émergence de complications car environ 80% des TSPT sont associés à au moins une comorbidité psychiatrique (Kessler et al., 1995), à commencer par la dépression qui affecte jusqu'à 30% des patients souffrant d'un TSPT (Ruiz & Kurkdjian, 2007). Parmi les autres comorbidités possibles du TSPT, on trouve les troubles anxieux, les idées et comportements suicidaires ou les troubles liés à l'usage de substances (Kessler et al., 1995). La place du corps dans le TSPT a toujours été une question centrale. En effet, les complications physiques du TSPT ne sont pas négligeables si l'on considère la présence de syndromes douloureux dans plus de 80% des cas de TSPT (Kessler et al., 2012). La fibromyalgie, les pathologies liées au stress telles que la cardiomyopathie de Takotsubo, le diabète, le syndrome métabolique, les maladies gastro-intestinales, les troubles thyroïdiens, les maladies auto-immunes ou les douleurs et gênes sexuelles sont fréquemment associés au TSPT (Pivac et al., 2023 ; Yehuda et al., 2015). Ainsi, nous comprenons que le corps est principalement considéré du point de vue de la douleur et des conséquences négatives du stress chronique, sans considérer la conscience corporelle.

La conscience du corps peut être définie comme une expérience sensorielle subjective associée à la conscience de soi, attribuée et localisée à soi, sans identification erronée, permettant ainsi la discrimination entre soi et le non-soi, on parle aussi d'un « *sentiment de séparation* », avec une identification de son corps en continuité avec le soi narratif (Brewer, 1995 ; Legrand, 2005 ; Lindström et al., 2022). La conscience du corps est principalement basée sur deux processus neurocognitifs que sont le sens de propriété du corps (*Sense of Body Ownership*, SBO) et le sens d'agentivité (*Sense of Agency*, SoA) (Braun et al., 2018 ; Lindström et al., 2022 ; Peacocke, 2023). Le SBO

et le SoA mettent en jeu l'extéroception (c'est-à-dire les informations sensorielles provenant du monde extérieur et notamment de la vue, l'ouïe, le goût, le toucher et l'odorat) et l'intéroception (c'est-à-dire les signaux sensoriels provenant des viscères et de l'intérieur du corps qui permettent au cerveau de maintenir l'homéostasie et qui sont étroitement liés à nos émotions, influençant ainsi nos prises de décision et nos comportements : par exemple, lorsque nous sommes confrontés à un danger, nous avons peur parce que nous courons et non l'inverse) (Cameron, 2001). L'intéroception est à la base de la conscience intéroceptive qui est un concept complexe et multidimensionnel (Garfinkel et al., 2015 ; Murphy et al., 2019) qui peut être définie comme « *la conscience sensorielle qui provient des états physiologiques, des processus et des actions du corps, et qui fonctionne comme un processus interactif qui inclut l'évaluation d'une personne et qui est façonné par ses attitudes, ses croyances et son expérience dans son contexte social et culturel* » (Mehling et al., 2009). Malgré une étude qualitative qui a démontré la présence de troubles de la conscience corporelle lors d'événements traumatiques majeurs (Ataria, 2015), la question centrale de la conscience corporelle est rarement mentionnée, voire souvent ignorée, dans les théories explicatives du TSPT. Pourtant, la compréhension de la conscience corporelle est essentielle à l'étude et au traitement des troubles psychiatriques. Ainsi, les anomalies de la conscience du corps sont étudiées depuis longtemps dans la schizophrénie où ils sont désormais considérés comme une théorie fondamentale de la physiopathologie de la maladie (Laurin et al., 2021 ; Rossetti et al., 2022, 2025). En revanche, la conscience corporelle reste largement inexplorée dans le TSPT, ce qui souligne la nécessité de poursuivre les recherches sur ce sujet, et c'est dans cette optique nous avons réalisé cette revue narrative. Avant de développer nos hypothèses initiales, il est important de souligner que les processus cognitifs de la conscience corporelle sont influencés par de nombreux facteurs, tels que l'âge et le sexe (Longo et al., 2008), l'état mental (Riemer et al., 2019) ou la douleur physique (Coppi et al., 2025). Par exemple, le lien entre la douleur et la conscience corporelle est connu depuis longtemps avec le syndrome du membre fantôme dans lequel la douleur proviendrait d'un conflit entre les informations sensorielles et les représentations mentales, c'est à dire que les yeux perçoivent un membre manquant alors que le cerveau n'est pas à jour et continue à percevoir le membre manquant dans les représentations mentales (Bogousslavsky, 2017). Ces facteurs non exhaustifs doivent toujours être pris en compte dans les études sur ce sujet (Riemer et al., 2019). C'est d'autant plus important si l'on considère les caractéristiques socio-démographiques du TSPT qui affecte principalement les femmes (dans la population civile), les jeunes (Chang et al., 2017 ; Kessler et al., 1995 ; Vogt et al., 2007) et si l'on considère toutes les comorbidités psychiatriques et physiques fréquemment associées au TSPT mentionnées ci-dessus.

Cela étant dit, la principale nouveauté de cette étude narrative réside dans l'examen complet des troubles de la conscience corporelle dans le TSPT, à l'aide de l'approche du traitement prédictif, afin de les intégrer dans les modèles explicatifs du TSPT. À cette fin, nous avons d'abord présenté les modèles physiopathologiques du TSPT tout en introduisant l'approche prédictive appliquée au TSPT. Cela nous permettra ensuite de mieux comprendre comment le SBO et le SoA peuvent être affectés dans le TSPT selon le sous-type dissociatif, ce qui nous conduira à proposer un modèle dimensionnel

et original des troubles de la conscience corporelle. Avec ce nouveau cadre conceptuel, les perspectives thérapeutiques prometteuses seront enfin discutées.

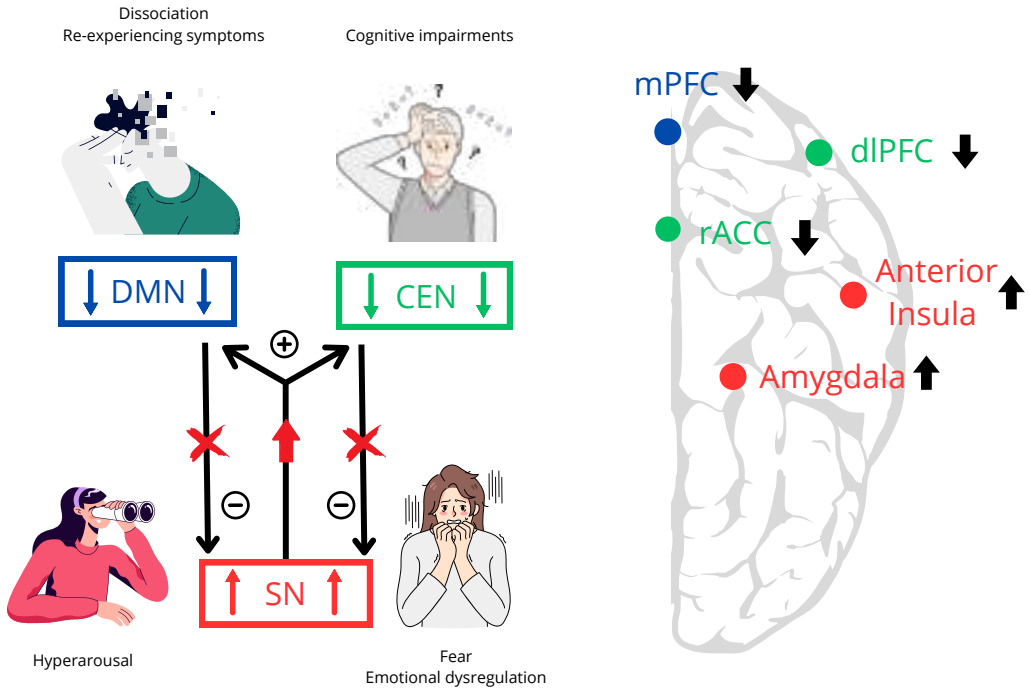
2. Les modèles explicatifs du TSPT

Les symptômes pathognomoniques de reviviscence constituent le cœur du TSPT et correspondent à des images intrusives, des flashbacks et des cauchemars liés à l'événement traumatique, incluant des expériences sensorielles et émotionnelles identiques à celles vécues pendant le psychotraumatisme, avec un sentiment de « *nowness* » caractérisé par l'impression que l'événement passé se produit dans le présent (Brewin, 2015 ; Shalev et al., 2017). En effet, indépendamment de la perspective temporelle et du contexte, et sans être affectés par les expériences ultérieures, les symptômes intrusifs et involontaires de reviviscence apparaissent en présence d'indices liés au psychotraumatisme quelle que soit la modalité sensorielle (Ehlers et al., 2004). Au vu des connaissances actuelles en neurosciences, les symptômes de reviviscence s'expliquent principalement par une hyperactivité de l'amygdale (impliquée dans les émotions et la peur) sans régulation par les structures corticales préfrontales (impliquées dans la régulation des émotions) et l'hippocampe (impliqué dans la contextualisation de la mémoire autobiographique et la régulation émotionnelle) (Shalev et al., 2017). En d'autres termes, le souvenir traumatique est stocké dans l'amygdale et reste principalement émotionnel et sensoriel, sans devenir un souvenir narratif intégré à la mémoire autobiographique qui est à la base du sentiment d'identité et de la continuité du soi (McKay et al., 2024).

Le souvenir spécifique lié au traumatisme est donc non évolutif et dépourvu de contextualisation. En utilisant l'approche basée sur les réseaux cérébraux (Bao et al., 2021 ; Ross & Cisler, 2020), des études sur le TSPT ont montré une hyperactivité et une connectivité du réseau de saillance (impliqué dans la détection des stimuli internes et externes pertinents) qui concentre l'attention sur les éléments internes ou externes perçus comme menaçant après une expérience traumatique, ce qui provoque une hypervigilance. Le réseau de saillance comprend le système limbique, avec l'amygdale hyperactive sans régulation par le réseau du mode par défaut et le réseau exécutif de contrôle, ce qui entraîne une peur persistante et une dysrégulation émotionnelle. Comme l'amygdale, l'insula antérieure est une structure cérébrale qui fait également partie du réseau de saillance (Schimmelpfennig et al., 2023). Parmi ses nombreuses fonctions, l'insula antérieure reçoit des informations sensorielles intéroceptives de l'insula postérieure, ainsi que les informations sensorielles du cortex pariétal, afin de leur donner une valence émotionnelle subjective grâce à des connexions riches avec le cortex cingulaire antérieur et l'amygdale, ce qui fait de l'insula antérieure une zone essentielle de la conscience intéroceptive et du soi incarné (Tisserand et al., 2023). L'hyperactivité de l'insula antérieure qui génère une focalisation attentionnelle interne, associé à l'hyperactivité des structures limbiques émotionnelles, peut expliquer une forte conscience intéroceptive dans le TSPT secondaire au renforcement des processus d'intégration des informations intéroceptives (hyperactivité de l'insula antérieure) qui sont eux-mêmes renforcés par la forte charge émotionnelle provenant de l'hyperactivité de l'amygdale (Hopper et al., 2007 ; Paulus & Stein, 2006). Cependant, peu d'études ont mis en évidence ces spécificités de la conscience intéroceptive chez

les patients atteints de TSPT, probablement en raison d'une difficulté à prêter attention aux sensations internes lorsqu'ils sont submergés par les émotions et les informations sensorielles ou perceptives liées au psychotraumatisme (Leech et al., 2024). L'hyperactivité du réseau saillant monopolise les ressources attentionnelles, ce qui affecte à la fois le réseau du mode par défaut (réseau impliqué dans l'autoréférence, la régulation des émotions et générant une conscience narrative de soi, c'est-à-dire une représentation stable de soi dans le temps associée à la continuité de l'identité), ce qui produit des symptômes de reviviscence et de dissociation, et le réseau exécutif de contrôle (réseau impliqué dans la cognition et les processus exécutifs), ce qui explique les troubles cognitifs (Bao et al., 2021 ; Ross & Cisler, 2020) (Figure 1).

Figure 1 : Altération des réseaux cérébraux dans le trouble de stress post-traumatique



Dans le TSPT, le réseau de saillance [EN ROUGE] est hyperactif avec une connectivité cérébrale accrue, mais sans contrôle par rétroaction négative, ce qui lui permet de moduler l'activité du réseau par défaut [EN BLEU] et du réseau de contrôle exécutif [EN VERT], qui sont deux réseaux cérébraux sous-actifs avec une connectivité cérébrale en déclin. Abréviations : CEN : réseau de contrôle exécutif, DMN : réseau par défaut, dlPFC : cortex préfrontal dorsolatéral, PFCm : cortex préfrontal médian, rACC : cortex cingulaire antérieur rostral, SN : réseau de saillance.

Pour réguler leurs émotions à la suite d'expériences traumatiques et éviter les symptômes de reviviscence, les patients atteints d'un TSPT esquivent les stimuli liés au traumatisme provenant de leur environnement en adoptant des comportements d'évitement qui sont désormais reconnus comme le principal mécanisme de développement et de maintien du TSPT *via* un processus de conditionnement par renforcement négatif (Orcutt et al., 2020 ; Seligowski et al., 2015). À la suite d'un événement traumatiques les croyances du sujet à propos de lui-même, des autres et du monde sont altérées, avec une augmentation des croyances négatives et une diminution des émotions positives (American Psychiatric Association, 2013). Selon le modèle de Janoff-Bulman (Janoff-Bulman, 2004), le traumatisme altère trois croyances

principales que sont la croyance en un monde juste, la croyance en un monde bienveillant et la croyance en sa propre compétence, ce qui laisse place à des sentiments d'autodépréciation, de honte ou de culpabilité (Brown et al., 2019). Pour d'autres auteurs, l'expérience traumatique génère l'impression que le monde est incontrôlable et imprévisible, modifiant ainsi les schémas cognitifs par une généralisation excessive des croyances altérées par le trauma, aussi nommée « *over accommodation* », ce qui a un impact négatif sur l'humeur (Clark et al., 2018 ; Dalgleish, 2004 ; Resick & Schnicke, 1992). Ces changements négatifs liés au traumatisme dans la cognition et l'humeur peuvent être médiés par des ruminations, c'est-à-dire des processus cognitifs dans lesquels l'individu se concentre de manière persistante, passive et répétée sur les causes, les significations et les conséquences du traumatisme (Brown et al., 2021). Dans un environnement perçu comme menaçant et dangereux, et sous l'effet négatif des ruminations, le patient se trouve constamment dans un état d'hypervigilance (Clark et al., 2018).

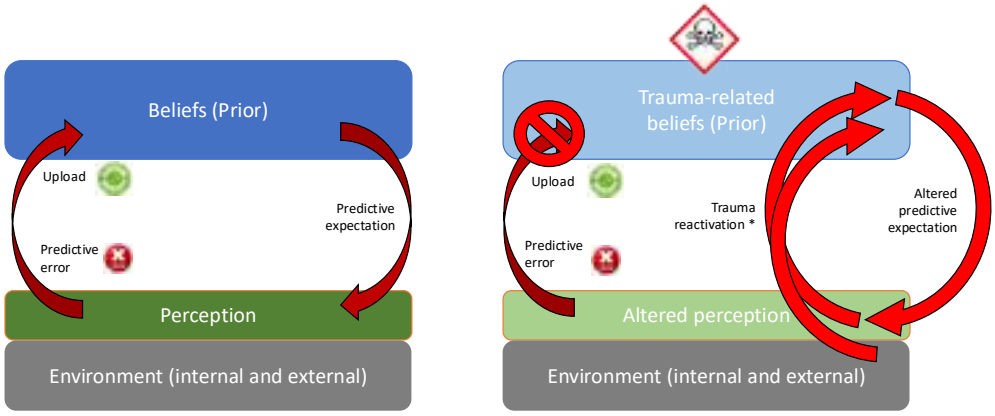
À ce jour, nous reconnaissons clairement que plusieurs théories (c'est à dire la théorie de la régulation émotionnelle, la théorie du conditionnement et la théorie cognitive) se complètent les unes avec les autres pour comprendre les symptômes du TSPT. Il est important de noter que le TSPT se caractérise par une hyperactivité émotionnelle (hyperactivité de l'amygdale) associée à une augmentation de l'intéroception (hyperactivité de l'insula antérieure). Cependant, les progrès récents en psychiatrie computationnelle ont donné naissance à une nouvelle approche intégrative qui a reconceptualisé le TSPT comme étant une pathologie mentale secondaire un dysfonctionnement du modèle de traitement prédictif (Kube et al., 2020). Cette approche récente du traitement prédictif nous offre un nouveau cadre conceptuel permettant de mieux appréhender les altérations de la conscience corporelle dans le TSPT.

3. La théorie prédictive appliquée au TSPT

La théorie prédictive postule que notre cerveau déduit, à partir des informations sensorielles, un modèle interne du monde extérieur (Montague et al., 2012 ; Stephan & Mathys, 2014). À son tour, ce modèle interne est utilisé pour créer des prédictions et des anticipations des informations sensorielles. Les prédictions circulaires sont basées sur des déductions sensorielles à partir de données existantes afin d'aboutir à une prédiction optimale en fonction (i) des croyances accumulées à partir d'expériences passées (« *prior* »), (ii) de la connaissance de la probabilité d'une hypothèse par rapport à une autre (poids de la preuve) et (iii) de l'application de la règle de Bayes, qui mesure le degré de fiabilité et non la fréquence relative des événements (Bottemanne, 2025 ; Montague et al., 2012 ; Stephan & Mathys, 2014). Cela implique que le cerveau génère constamment des anticipations sensorielles à partir des croyances existantes afin de générer un message d'erreur lorsque les prédictions sont violées (« *erreur de prédiction* »), c'est-à-dire lorsqu'il n'y a pas de correspondance entre la prédiction issue des croyances antérieures et les informations sensorielles entrantes. Il est clair que le cerveau est un système d'entrée sensorielle actif capable de générer des prédictions, d'utiliser des données passées pour prédire le présent, de contrôler leur validité et de corriger les erreurs prédictives par

l'apprentissage (Barrett & Simmons, 2015 ; Kanai et al., 2015 ; Köster et al., 2020 ; Paulus et al., 2019). La correction des erreurs de prédiction entraîne donc une modification du système de croyances afin de mettre à jour de manière dynamique les prédictions ultérieures. Cependant, toutes les erreurs de prédiction ne sont pas responsables de la mise à jour des croyances. La probabilité que de nouvelles informations sensorielles mettent à jour les prédictions dépend de leur précision, en comparant la certitude des informations sensorielles à la certitude des croyances antérieures (Barrett & Simmons, 2015 ; Kanai et al., 2015 ; Köster et al., 2020 ; Paulus et al., 2019). Si nous avons des croyances avec un niveau élevé de certitude et de précision, la croyance précédente restera insensible à une mise à jour des informations sensorielles avec un niveau de précision inférieur. Voici le mécanisme qui explique comment les nouvelles informations sensorielles peuvent ou non mettre à jour les croyances antérieures à la base des prédictions sensorielles. Il est important de garder à l'esprit que la prédiction est indissociable de la perception. Selon la théorie de l'inférence bayésienne, la prédiction probabiliste *a priori* (« *prior* ») est combinée efficacement avec la probabilité des nouvelles informations sensorielles (« *likelihood* ») pour concevoir une perception *a posteriori* (Knill & Pouget, 2004). En d'autres termes, la perception est le résultat d'une interaction entre la prédiction et les entrées sensorielles. Par conséquent, nous ne percevons pas le monde tel qu'il est, mais tel que le cerveau le prédit en fonction de nos croyances antérieures et de nos expériences passées (Figure 2).

Figure 2 : La théorie prédictive appliquée au trouble de stress post-traumatique



(A) Sujets sains (B) TSPT

** Réactivation du psychotraumatisme par la présence d'indices liés au traumatisme et/ou par une perception négative altérée et/ou par une inférence intéroceptive.*

Sur la base de ces connaissances fondamentales, le TSPT a été réexaminé dans le cadre de la théorie prédictive (pour une revue, voir Kube et al., 2020) qui est résumée dans la Figure 2. En résumé, en raison de sa nature menaçante, l'événement traumatisant est considéré comme un événement de haute précision, mais il est toujours modulé en fonction de la perception de l'individu, elle-même basée sur les croyances et expériences antérieures (Kube & Rozenkrantz, 2021). Par conséquent, l'expérience potentiellement traumatique peut facilement mettre à jour les croyances d'un individu qui n'a pas de croyances antérieures avec un degré de précision supérieur. Une fois

intégré, le système de croyances contiendra des croyances hyperprécises et des perceptions négative altérées par le traumatisme. Par conséquent, les nouveaux stimuli sensoriels extéroceptifs et intéroceptifs peuvent réactiver l'hypothèse perceptive codée lors de l'événement traumatique, avec une probabilité *a priori* élevée, même si elle ne correspond pas au stimulus sensoriel actuel dont la précision est diminuée par l'atténuation. En d'autres termes, les symptômes de reviviscence du TSPT seraient la conséquence d'une réactivation abusive des croyances hyperprécises de l'événement traumatique face à de nouvelles entrées sensorielles qui seraient alors interprétées par l'individu comme menaçantes, générant les perceptions altérées négatives, et sans mise à jour contextuelle. Dans une situation où des croyances négatives altérées (« *prior* ») l'emportent sur les informations sensorielles (« *likelihood* »), la perception négative de l'environnement intègre les souvenirs du traumatisme sous forme de flashbacks ou de symptômes de reviviscence. En raison de son caractère hyperprécis, l'événement traumatique est peu susceptible d'être mis à jour par d'autres expériences moins précises. Cela est d'autant plus vrai que les informations traumatiques semblent insensibles au biais d'optimisme (Garrett et al., 2018) ; elles créent une plus grande intégration des informations négatives au détriment des informations avec une valence émotionnelle positive qui sont généralement intégrées avec plus de précision. Dans ce contexte, les comportements d'évitement posent un double problème : ils conditionnent la peur par l'évitement et empêchent la personne de vivre de nouvelles expériences qui pourraient prouver que la peur est infondée et les aider à mettre à jour les croyances altérées en lien avec le psychotraumatisme. Ainsi, les comportements d'évitement empêchent les personnes atteintes d'un TSPT d'explorer et de mettre à jour leurs croyances altérées, avec des prédictions négatives qui sont à l'origine de troubles de l'humeur. Celles-ci peuvent être à l'origine de réactions physiologiques et corporelles proches de celles vécues ressentis pendant le psychotraumatisme, avec un risque de réactivation par inférence intéroceptive (Joshi et al., 2023). La théorie du traitement prédictif conçoit le TSPT comme un trouble caractérisé par un système prédictif et perceptif altéré qui entre en jeu après un événement singulier impliquant un événement traumatique qui a une précision relative selon la perception de l'individu dans un environnement spécifique.

Au total, dans l'approche du traitement prédictif, le TSPT se caractérise par la dominance des croyances liées au psychotraumatisme (« *prior* ») sur les entrées sensorielles (« *likelihood* »). De plus, les informations intéroceptives (générées par l'hyperactivité de l'amygdale antérieure et du système limbique) ont plus de fiabilité que les informations extéroceptives. En conséquence, nous proposons de conceptualiser le TSPT comme un état pathologique dans lequel la hiérarchie de la précision pondérée entre les processus cognitifs et sensoriels est classée comme suit : « **PRIOR** $_{\text{liée au trauma}}$ **> LIKELIHOOD** $_{\text{intéroception}}$ **> LIKELIHOOD** $_{\text{extéroception}}$ ». Dans ce modèle bayésien, le TSPT est lié à une latération du système de prédiction-perception après un événement psychotraumatique, produisant des croyances négatives hautement fiables qui résistent à la mise à jour. Ce système de prédiction-perception altéré dans le TSPT a des implications théoriques et empiriques sur les fonctions cognitives qui dépendent de ce système, en particulier le sens de propriété du corps (SBO) et le sens d'agentivité (SoA).

4. Le sens de propriété du corps et d'agentivité

4.a. Le sens de propriété du corps

Le SBO fait référence au statut perceptif de son propre corps qui rend les sensations corporelles uniques à soi-même et permet la distinction entre soi et les autres (Gallagher, 2000 ; Tsakiris et al., 2007). Sur le plan neurocognitif, le SBO repose sur un réseau cérébral comprenant l'insula antérieure (intégration des signaux intéroceptifs et émotionnels) ; le cortex pariétal (processus d'intégration multisensorielle) ; le lobe pariétal inférieur (comparaison des informations sensorielles avec les prédictions causales) ; le cortex pariétal postérieur (représentation spatiale du corps) ; le cortex prémoteur (représentations corporelles liées à la motricité) ; et le réseau du mode par défaut (conscience narrative de soi) (Ehrsson, 2020). Le SBO résulte de l'intégration multisensorielle des signaux extéroceptifs et intéroceptifs (Blanke, 2012). Les représentations corporelles immédiates et malléables (*online*, *bottom-up*) sont continuellement comparées à des modèles corporels stables et à long terme (*top-down*) afin de générer une perception corporelle de soi cohérente, conforme aux contraintes spatio-temporelles, tout en empêchant l'incorporation de formes non corporelles (Braun et al., 2018 ; Ehrsson, 2020 ; Tsakiris, 2010).

Ces mécanismes peuvent être décrits dans le cadre de l'inférence causale bayésienne dans lequel le cerveau estime la cause la plus probable des signaux sensoriels en mettant en balance les attentes antérieures et les entrées sensorielles actuelles (Ehrsson, 2020 ; Litwin, 2020 ; Tsakiris et al., 2010). Un modèle multisensoriel probabiliste récent se concentre sur la manière dont les signaux sensoriels sont interprétés sur la base de la théorie bayésienne (Körding et al., 2007). Les informations relatives au corps ne sont intégrées que si elles sont anatomiquement cohérentes, se produisent dans l'espace personnel et sont synchronisées dans le temps (< 300 millisecondes de délai) (Ehrsson, 2020). Cela détermine le niveau d'incertitude sensorielle et les expériences antérieures qui génèrent les « *priorités* » qui sous-tendent les prédictions causales (Chancel et al., 2022 ; Samad et al., 2015). Ce processus d'inférences causales bayésiennes détermine donc la décision perceptive automatique de combiner ou de séparer les signaux visuels et somatosensoriels afin de former ou non une représentation cohérente des parties du corps (O'Kane et al., 2024). Il convient de noter qu'une expérience sensorielle antérieure marquante, telle qu'un événement traumatisant, peut modifier les représentations mentales et les croyances que l'on a de soi-même, ce qui aura une incidence sur les prédictions sensorielles et perceptives qui en résultent. D'autres facteurs influents doivent être pris en compte, en particulier les émotions. En effet, le SBO intègre des informations intéroceptives étroitement liées aux émotions (Engelen et al., 2023). En résumé, le SBO est étroitement lié à divers processus interconnectés, à savoir les processus d'auto-prédiction et d'auto-perception, les processus d'intégration sensorielle et les processus émotionnels, qui sont tous considérablement altérés dans le TSPT.

Ainsi les troubles de la conscience du corps dans le TSPT peuvent être expliqués plus en détail en tenant compte des éléments suivantes : (i) les anomalies dans les zones

cérébrales impliquées dans le SBO (par exemple, l'insula antérieure, l'amygdale, le DMN) ; (ii) l'hyperactivité de l'amygdale provoque des émotions intenses qui renforcent la précision des croyances liées au psychotraumatisme ; (iii) l'hyperactivité de l'insula antérieure, associée à de fortes émotions limbiques, renforce la conscience de l'intéroception ; (iv) donc, une forte attention endogène ; (iv) l'altération négative des croyances sur soi et sur l'environnement. Nous considérons donc le TSPT comme un état dans lequel la précision et la fiabilité des processus cognitifs sont classées comme suit : « **PRIOR** $_{\text{liée au trauma}}$ **> LIKELIHOOD** $_{\text{intéroception}}$ **> LIKELIHOOD** $_{\text{extéroception}}$ ». Par conséquent, le SBO est considéré comme très rigide et inflexible, peu sensible aux expériences sensorielles ultérieures et donc sans mise à jour perceptuelle.

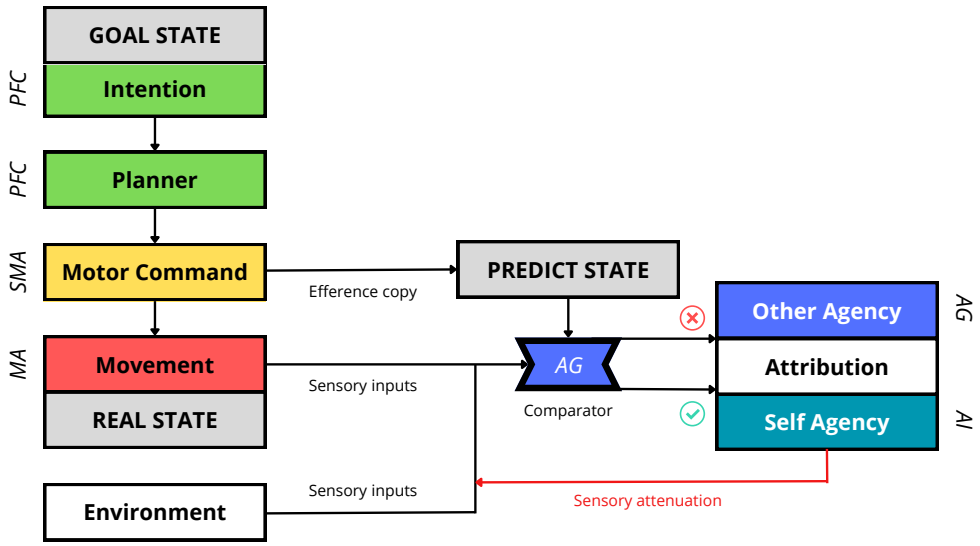
4.b. Le sens d'agentivité

Le sens d'agentivité (SoA) fait référence à la conscience d'être l'auteur d'une action volontaire, d'avoir le contrôle sur l'action motrice et, par extension, d'anticiper les conséquences de l'action sur l'environnement extérieur (Haggard, 2017 ; Moore, 2016). Nous nous concentrerons ici sur le sens d'agentivité préréflexif, qui dépend du système sensorimoteur et qui est le sentiment immédiat et de bas niveau d'être l'auteur d'une action. Il convient de le distinguer du jugement d'agentivité, lié à des processus cognitifs de haut niveau avec des processus d'attribution causale qui n'ont aucun lien spécifique avec le système sensorimoteur (Synofzik et al., 2008).

La théorie la plus répandue concernant le SoA est le « *modèle comparateur* » (Frith, 2012 ; Frith et al., 2000) (Figure 3). Ce modèle computationnel repose sur le système de contrôle moteur, dans lequel chaque action volontaire commence par une intention et une planification impliquant principalement le cortex frontal et préfrontal (Rowe et al., 2010). Une fois le programme moteur sélectionné, sur la base de l'apprentissage par l'expérience (modèle inverse), le système moteur (Fried et al., 2011 ; Rowe et al., 2010) peut produire une représentation de l'état souhaité avec des copies efférentes en aval de l'action, c'est-à-dire une prédiction des conséquences sensorielles internes et externes de l'action sélectionnée. Au cours d'un mouvement volontaire effectif, les copies efférentes sont comparées au retour sensoriel lié à l'action (Frith, 2012), un processus de comparaison impliquant principalement le lobe pariétal inférieur avec le gyrus angulaire et le gyrus temporal supérieur (Zito et al., 2020). Ainsi, le SoA est généré lorsque le retour sensoriel de l'action volontaire correspond à la prédiction qui en a été faite, sans erreur de prédiction. Dès lors, le SoA génère un processus d'atténuation sensorielle dans lequel l'intensité perçue des conséquences sensorielles de l'action volontaire est inférieure à celle d'autres stimuli externes imprévisibles. Cela explique pourquoi nous ne pouvons pas nous chatouiller nous-mêmes, car nous atténuons nos propres stimuli sensoriels (Blakemore et al., 2000). Le processus cognitif final et distinct est l'attribution de l'action à soi-même (« *self-agency* »), un processus qui implique principalement l'insula antérieure (Craig, 2009 ; Farrer & Frith, 2002a), ou à autrui (« *other-agency* »), un processus qui implique principalement le gyrus angulaire (Farrer & Frith, 2002a ; Sperduti et al., 2011).

À notre connaissance, il existe très peu de données sur la SoA dans le TSPT, et celles qui existent sont de mauvaise qualité bien que cohérentes dans la mesure où aucune altération de la SoA n'a été constatée (à l'exception du moment où a lieu le psychotraumatisme et les moments de dissociation, que nous aborderons dans la section suivante) (Rabellino et al., 2018). Ce point de vue est conforme à la pratique clinique, dans laquelle les patients atteints de TSPT ne présentent pas de troubles de la SoA, au sens du SoA préréflexive. En outre, nous supposons que le SoA est beaucoup moins impliquée dans les processus perceptifs et émotionnels que le SBO. Par conséquent, la SoA, qui est liée aux processus de prédiction sensorielle, peut-être moins affectée dans le TSPT. Il peut même être accru en raison de l'hyperactivité de l'insula antérieure qui est impliquée dans l'attribution de l'action à soi-même (« *self-agency* ») (Craig, 2009 ; Farrer & Frith, 2002a).

Figure 3 : Le modèle comparateur dans le contrôle neuronal de l'action



Le modèle comparateur repose sur cinq étapes principales : (i) la volonté et la préparation de l'action (en vert), impliquant principalement le cortex frontal et préfrontal (PFC) - (ii) la sélection des commandes motrices et la prédiction de leurs conséquences sensorielles (copies efférentes) (en jaune), impliquant principalement la zone motrice supplémentaire (SMA) - (iii) l'exécution de l'action (en rouge), impliquant l'aire motrice (MA), qui génère un retour d'informations sensorielles internes et externes qui sont intégrées principalement dans le cortex pariétal - (iv) la comparaison des informations sensorielles de l'action avec la prédiction motrice (en bleu) impliquant le gyrus angulaire (AG), le lobe pariétal inférieur et le gyrus temporal supérieur. Ensuite, l'attribution de l'action est faite à soi-même (« self-agency ») impliquant principalement l'insula antérieure (AI), ou à autrui (« other-agency ») impliquant principalement le gyrus angulaire (AG).

Jusqu'à présent, l'approche fondée sur la théorie prédictive nous permet d'apporter des éclairages novateurs sur les troubles de la conscience corporelle dans le TSPT. D'une part, le développement du SBO est entravé par des croyances négatives très fiables liées au traumatisme et peu sensible aux mises à jour perceptuelles, qui se traduit par des représentations mentales hyperrigides et inflexibles de soi. D'autre part, le SoA préréflexif semble peu altéré, voire augmenté par un processus du « *self-agency* » renforcé. Cependant, lorsqu'il s'agit du sous-type dissociatif du TSPT, des hypothèses plus détaillées sont discutées dans la section suivante.

5. Le TSPT de sous-type dissociatif

Le TSPT n'est pas un trouble mental homogène car il existe un sous-type dissociatif qui présente des différences cliniques et neurologiques importantes. Dans le TSPT dissociatif, les personnes décrivent fréquemment la présence de symptômes de déréalisation (sentiment que le monde extérieur est irréel, comme dans un rêve, lointain et distant) et de dépersonnalisation (sentiment d'étrangeté et de distance par rapport à son propre corps) (American Psychiatric Association, 2013). Le sous-type dissociatif représente 30% des TSPT (Lanius et al., 2007) et serait la conséquence d'un « *syndrome de déconnexion limbique* » (Sierra & Berrios, 1998). Contrairement au TSPT non dissociatif, le sous-type dissociatif se caractérise par une hypoactivité de l'amygdale et de l'insula antérieure secondaire à une inhibition excessive du CPF (Menon, 2021). Il a été proposé que la dissociation soit un processus protecteur visant à étouffer la douleur émotionnelle liée au psychotraumatisme, une douleur qui se situerait en dehors de la fenêtre de tolérance de l'individu. Les émotions qui sont ainsi surrégulées par le CPF (Lebois et al., 2022) affecte la conscience corporelle qui est elle-même liée aux émotions. Cette hyper-inhibition limbique affecte également d'autres structures cérébrales telles que le cortex cingulaire antérieur, la substance grise périaqueducale (impliquée dans une cascade de douleur et de défense avec immobilité), le précunéus et l'insula antérieure (impliqués dans la conscience corporelle, la gestion des émotions et la régulation du système nerveux autonome) (Murphy, 2023). La dissociation se caractérise également par une hyperconnectivité entre le réseau exécutif de contrôle et le réseau du mode par défaut, empêchant une conscience de soi et une autoréférence optimale, et associée à une hyperactivité du pariétal inférieur droit (impliqué dans la conscience corporelle, l'intégration multisensorielle, la perspective spatiale et la théorie de l'esprit) (Sierra & David, 2011 ; Zheng et al., 2022). En résumé, le TSPT dissociatif présente un « *profil neurologique* » opposé à celui du TSPT dit simple et qui se caractérise par une anesthésie émotionnelle et une surmodulation des fonctions exécutives par le CPF. Les troubles de la conscience corporelle sont donc susceptibles de différer entre le TSPT simple et le TSPT dissociatif en raison de perturbations spécifiques de la conscience corporelle. Compte tenu de ces éléments, le sous-type dissociatif du TSPT se caractériserait par des croyances négatives liées au psychotraumatisme affaiblies par une inhibition émotionnelle associées à une faible intéroception due à une inhibition émotionnelle combinée à une hypoactivité de l'insula antérieure (Hopper et al., 2007 ; Leech et al., 2024 ; Nicholson et al., 2016).

L'hyperactivité spécifique du lobe pariétal inférieur droit (rIPL) dans le sous-type dissociatif du TSPT a de nombreuses conséquences pour le SBO et le SoA. Le rIPL soutient normalement l'intégration sensorielle descendante en surveillant et en empêchant l'incorporation erronée de stimuli externes dans le schéma corporel. La perturbation de la régulation du rIPL dans la dissociation entraîne des représentations de soi instables et hyper-malléables et une altération de la discrimination entre soi et les autres. La preuve de ce maintien de la cohérence par le rIPL a été confirmée par une étude dans laquelle des sujets sains ayant reçu une stimulation magnétique transcrânienne (TMS) à impulsion unique au niveau du rIPL pendant la tâche de l'illusion de la main en caoutchouc (section suivante) ont été amenés à incarner des objets non humanoïdes (Tsakiris et al., 2008). En outre, l'hyperactivité du rIPL, en

particulier dans le gyrus angulaire droit, a été associée à un biais d'attribution d'action, par lequel des actions volontaires sont attribuées à tort à un autre agent (« *other-agency* ») (Farrer et al., 2003 ; Farrer & Frith, 2002b). Enfin, l'hyperactivité du rIPL altère l'expérience corporelle de la localisation de soi, un processus distinct de la conscience de soi (Ionta et al., 2011). Sur la base des modèles de prise de perspective médiée par la localisation de soi (de Boer et al., 2020), des prédictions sensorielles précises provoquent normalement une inhibition du gyrus angulaire par le CPF, alignant la localisation de l'action avec l'expérience de soi grâce à l'attention endogène. À l'inverse, en cas d'erreur de prédiction, le CPF lève l'inhibition sur le gyrus angulaire qui s'active pour concentrer l'attention sur le monde extérieur (attention exogène) afin d'analyser l'origine de l'erreur de prédiction. Dans la dissociation, l'hyperactivité persistante du CPF empêche ce découplage et continue son inhibition malgré l'activation du rIPL, signalant ainsi simultanément des prédictions correctes de soi tout en maintenant l'attention vers l'extérieur. Ce décalage ancre l'expérience de la conscience de soi au niveau du corps tout en déplaçant la localisation de soi vers l'extérieur ce qui produit des symptômes de dépersonnalisation et d'expériences extracorporelles (OBE). Ces effets sont corroborés par des modèles pathologiques tels que les OBE induites par l'épilepsie temporo-pariétale (Heydrich et al., 2011), la stimulation électrique du gyrus angulaire droit qui induit systématiquement desz OBE (Blanke et al., 2002) et les études sur la stimulation électrique transcrânienne reliant l'activité du gyrus angulaire droit à une augmentation de l'illusion perceptuelle (SBO) et à une diminution de l'auto-agentivité (« *self-agency* ») (de Boer et al., 2020).

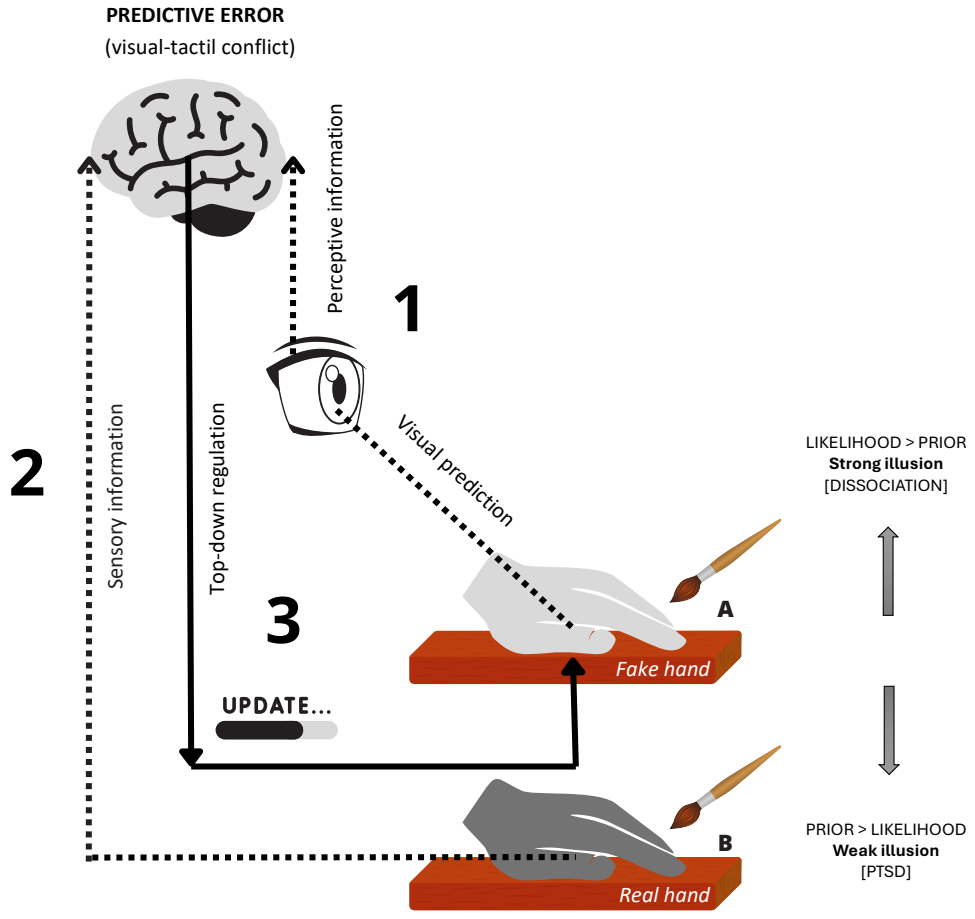
Au total, compte tenu de l'affaiblissement de la fiabilité des croyances liées au psychotraumatisme dans un contexte de réduction des émotions (hyper-inhibition de l'amygdale) et de l'intéroception (hyper-inhibition de l'insula antérieure et du système limbique) associé à une forte attention exogène (hyperactivité du gyrus angulaire) qui renforce l'extéroception, la précision et la fiabilité des processus cognitifs du sous-type dissociatif du TSPT seraient classées comme suit : « **LIKELIHOOD** $_{\text{extéroception}}$ **> LIKELIHOOD** $_{\text{intéroception}}$ **> PRIOR** $_{\text{liée au trauma}}$ ». La stabilité de la représentation mentale du corps, et du SBO, est gravement perturbée en raison de la forte fiabilité et saillance des entrées sensorielles, ce qui se manifeste cliniquement par de la déréalisation et de la dépersonnalisation. Cette instabilité du SBO est d'autant plus fragile que l'hyperactivité du gyrus angulaire affecte les processus de prédiction et de surveillance des informations sensorielles. Il est intéressant de noter que cette théorie semble cohérente avec les nombreuses données issues de l'illusion de la main en caoutchouc, comme présenté dans la section suivante. En ce qui concerne la SoA, l'hyperactivité du gyrus angulaire dans le sous-type dissociatif du TSPT renforce les processus d'attribution de l'action à autrui (« *other-agency* »), réduisant le sens de l'agentivité préréflexive lié à soi (« *self-agency* ») (Adrien et al., 2023). Cela peut conduire à une attribution erronée des actions auto-générées à des causes externes, produisant le sentiment caractéristique d'étrangeté du mouvement observé dans la dépersonnalisation.

6. TSPT et la tâche de l'illusion de la main en caoutchouc

Le test de référence pour étudier le sens de propriété du corps (SBO) est la tâche de l'illusion de la main en caoutchouc (*Rubber Hand Illusion*, RHI) (Botvinick & Cohen,

1998) dans laquelle la main réelle du sujet est placée dans un gant en caoutchouc et cachée à la vue, tandis qu'une fausse main dans un gant en caoutchouc identique est placée dans une position congruente visible par le sujet. Selon la théorie du codage prédictif (Friston, 2005, 2011), lorsque les deux mains reçoivent des caresses synchronisées, le cerveau du participant prédit une sensation tactile sur la fausse main visible mais la ressent sur la main réelle cachée. Cela génère une erreur de prédiction visuo-tactile que le cerveau corrige en mettant à jour les représentations mentales du corps en intégrant la fausse main (« *embodiment* ») au détriment de la main réelle (« *disembodiment* »). Dans des conditions normales, la vision a un degré de précision plus élevé que les autres sens. Elle module d'autres régions du cerveau impliquées dans la RHI telles que les zones somatosensorielles primaires ou le cortex prémoteur, un processus également appelé réduction descendante de l'erreur de prédiction (Zeller et al., 2016) (Figure 4). Ainsi, la RHI met en évidence les processus bayésiens de prédiction et de perception qui sous-tendent le SBO (Litwin, 2020).

Figure 4: The rubber hand illusion



(1) Prédiction visuelle où le sujet s'attend à voir et à sentir la caresse du pinceau sur la main factice (A) visible par le sujet. (2) Entrée sensorielle de la caresse du pinceau au niveau de la main réelle (B), cachée et décalée par rapport à la main factice, qui ne correspond pas à la prédiction visuelle, c'est-à-dire une erreur de prédiction. (3) Modulation des zones somatosensorielles pour résoudre le conflit visuo-tactile en intégrant la fausse main comme étant la nôtre et en ressentant la caresse du pinceau au niveau de la main factice : c'est l'illusion dans la RHI.

Deux mesures sont possibles avec la RHI (Botvinick & Cohen, 1998). La première est une mesure sensorielle objective appelée dérive proprioceptive, qui quantifie (en centimètres) la différence de hauteur ressentie par le sujet concernant la localisation de la main réelle avant et après une stimulation : une dérive proprioceptive positive indique un déplacement de la sensation de la main réelle vers la main artificielle. La seconde mesure est une évaluation subjective de la force de l'illusion perçue à l'aide d'un questionnaire spécifique. Il convient de noter que ces deux mesures s'influencent mais sont liées à deux processus cognitifs distincts (Gallagher et al., 2021). La dérive proprioceptive est principalement liée aux informations sensorielles qui tendent à générer et à favoriser l'illusion, car les yeux perçoivent la stimulation au niveau de la fausse main et induisent la mise à jour des représentations corporelles. Les mesures subjectives de l'illusion perçue, telles que la perception de la force de l'illusion par le sujet, sont dérivées d'un équilibre entre les informations sensorielles (« *likelihood* ») et les croyances antérieures (« *prior* ») qui modulent l'illusion, étant donné que l'on sait que la main réelle se trouve sous la fausse main. De plus, la conscience intéroceptive est un facteur potentiel qui stabilise les représentations mentales et réduirait donc l'illusion dans la RHI (Tsakiris et al., 2011). Cette influence doit être traitée avec prudence compte tenu de résultats variables voire contradictoires dans la littérature scientifique (Kaneno et al., 2024). Il est généralement admis qu'une illusion forte induite par le paradigme expérimental de la RHI peut avoir plusieurs causes, notamment : des croyances trop faibles et très sensibles à la mise à jour générée par l'erreur de prédiction ; des informations sensorielles extéroceptives très fortes et fiables dans un contexte d'hyper-focalisation attentionnelle et/ou un manque de régulation ; et éventuellement d'une conscience intéroceptive faible incapable de limiter l'illusion. À l'inverse, nous comprenons que dans le paradigme expérimental de la RHI, une illusion faible peut avoir plusieurs causes, notamment : des croyances trop fortes et insensibles à la mise à jour requise par l'erreur de prédiction ; des informations sensorielles extéroceptives très faibles et peu fiables dans un contexte d'hypo-focalisation attentionnelle de l'attention et/ou de surrégulation sensorielle notamment par les croyances antérieures ; voire une forte conscience intéroceptive capable de limiter l'illusion (Figure 4).

À notre connaissance, une seule étude a testé la RHI chez des patients atteints de TSPT, comparant les mesures de la RHI avec à un groupe de patients souffrant de TSPT de sous-type dissociatif et à des sujets contrôles (Rabellino et al., 2018). Cette étude a montré que le groupe TSPT présentait des mesures subjectives et objectives inférieures à celles des autres groupes. Les auteurs ont expliqué ces résultats par un manque d'engagement et une tendance à l'évitement dans la tâche cognitive. Avec l'approche bayésienne, les résultats peuvent s'expliquer par des croyances puissantes et fiables (en raison de la forte charge émotionnelle de l'amygdale) qui sont insensibles à la mise à jour induite par la RHI pour générer l'illusion. Cette illusion est d'autant plus difficile à générer si l'on considère la forte conscience intéroceptive qui peut potentiellement stabiliser les représentations mentales (en raison de l'hyperactivité de l'insula antérieure associée à l'hyperactivité de l'amygdale). De plus, les informations extéroceptives seraient assez faibles dans le TSPT (en raison de la surrégulation des croyances fortes dans le processus de prédiction, en raison de son association avec des capacités d'attention exogènes réduites). Ces éléments sont

conformes à nos hypothèses précédemment développées concernant le TSPT : « **PRIOR** $_{\text{liée au trauma}}$ **> LIKELIHOOD** $_{\text{intéroception}}$ **> LIKELIHOOD** $_{\text{extéroception}}$ » (Figures 4 et 5).

À l'inverse, le groupe présentant le sous-type dissociatif du TSPT a affiché des mesures plus élevées que les deux autres groupes, et tout particulièrement une dérive proprioceptive importante (Rabellino et al., 2018). Par conséquent, les informations sensorielles externes semblaient hyper saillantes dans le TSPT de sous-type dissociatif. Ces résultats peuvent s'expliquer par un affaiblissement des croyances (dû à l'inhibition émotionnelle de l'amygdale) qui ont dès lors une grande sensibilité aux mises à jour induites lors de l'illusion perceptive de la RHI. Cette illusion est d'autant plus facile à générer avec une conscience intéroceptive faible, qui stabilise probablement moins les représentations mentales (en raison de l'inhibition de l'insula antérieure associée à l'inhibition de l'amygdale), combinée à des informations extéroceptives plus fortes et saillantes (en raison d'une sous-régulation par des croyances affaiblies dans le processus de prédiction associé à des capacités d'attention exogènes accrues avec une hyperactivité du gyrus angulaire au détriment des capacités d'attention endogènes). Tous ces éléments sont conformes à nos hypothèses précédemment développées concernant le TSPT de sous-type dissociatif : « **LIKELIHOOD** $_{\text{extéroception}}$ **> LIKELIHOOD** $_{\text{intéroception}}$ **> PRIOR** $_{\text{liée au trauma}}$ » (Figures 4 et 5).

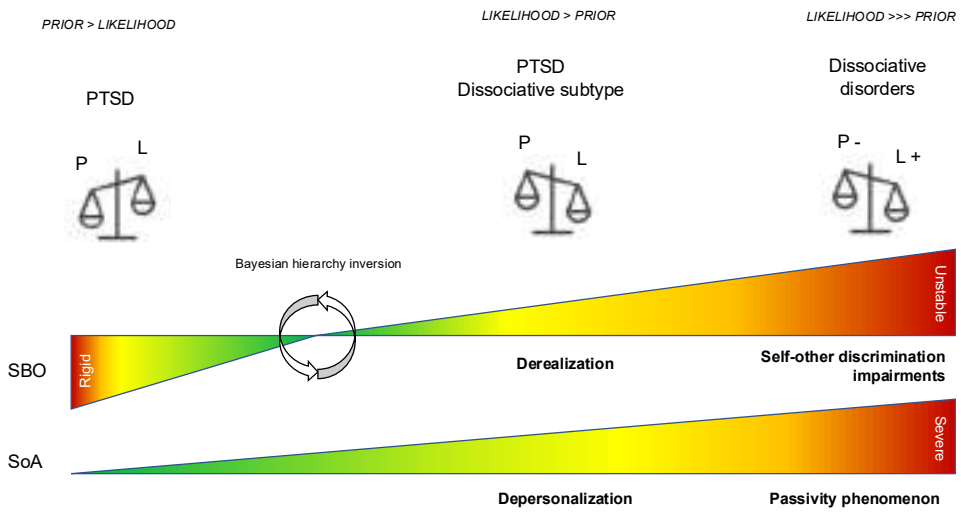
En ce qui concerne la forte dérive proprioceptive dans le groupe TSPT de sous-type dissociatif (Rabellino et al., 2018), des résultats similaires ont été observés dans une étude utilisant la RHI chez des sujets sains sous kétamine intraveineuse (antagoniste des récepteurs N-méthyl-D-aspartate (NMDA-r)), où la RHI a été réalisée avant et pendant des symptômes dissociatifs induits par la kétamine (Morgan et al., 2011). Les résultats ont montré que les sujets présentaient une dérive proprioceptive plus importante pendant la période de dissociation qu'à leur niveau de référence. Les auteurs ont émis l'hypothèse que la kétamine augmenterait la saillance des entrées sensorielles. Plus généralement, cette étude soulève la question du rôle des NMDA-r et du glutamate dans le processus de conscience corporelle et de prédiction. Le glutamate est le principal neurotransmetteur des voies sensorielles ascendantes, permettant le traitement, la combinaison et l'interprétation des signaux provenant de différentes modalités sensorielles (Cai et al., 2023 ; Levit-Binnun et al., 2013 ; Meldrum, 2000 ; Noorman et al., 2025). Dans la théorie du codage prédictif, le glutamate est impliqué dans les mécanismes prédictifs de la conscience corporelle en tant que principal neurotransmetteur des erreurs de prédiction ascendantes (Amo et al., 2024). Mais il est également impliqué dans la modulation descendante, notamment dans la régulation de la précision concernant les différents signaux sensoriels afin de distinguer les signaux précis, fiables ou pertinents (selon nos croyances, nos émotions et les situations dangereuses) qui méritent ce qu'on appelle une amplification attentionnelle (Boroujeni & Womelsdorf, 2023 ; Fazekas & Nanay, 2021). Des anomalies dans la régulation de la précision des signaux sensoriels peuvent être responsables d'une baisse de précision des stimuli pertinents pouvant engendrer un manque de discrimination entre les informations sensorielles provenant de soi (généralement prédits, atténués, faible niveau d'attention) ou

provenant du non-soi (généralement non prédits, non atténués, niveau d'attention plus élevé) (Adams et al., 2013 ; Fletcher & Frith, 2009 ; Uno & Coyle, 2019). En cas de décalage entre la prédiction et le retour sensoriel, une erreur de prédiction est générée et transmise via les synapses glutamatergiques dépendantes du NMDA afin de corriger le modèle interne. La kétamine, en tant qu'antagoniste non compétitif du NMDA-r, bloque partiellement le fonctionnement des récepteurs NMDA, ce qui entraîne des erreurs de prédiction qui ne sont plus correctement transmises ou corrigées (Mohanta et al., 2021 ; Wehrman et al., 2023). Le cerveau n'étant plus en mesure d'ajuster ses prédictions au retour sensoriel, les signaux corporels deviennent étranges et détachés. Cet effet de la kétamine sur le système de prédiction est comparable à la dissociation du TSPT qui est caractérisée par une hypo-fonction glutamatergique / NDMA-r (Averill & Abdallah, 2022). Il convient de noter que si le système prédictif n'annule plus correctement les conséquences sensorielles attendues des actions volontaires, la SoA sera altérée car sans atténuation sensorielle, les informations sensorielles provenant du soi auront la même saillance que celles provenant du non-soi provenant de l'extérieur (Adams et al., 2013 ; Fletcher & Frith, 2009 ; Uno & Coyle, 2019). Nous comprenons comment le système glutamatergique / NMDA-r modifie ainsi les processus prédictifs et la conscience corporelle. Contrairement à son sous-type dissociatif, le TSPT se caractérise par une hyper-fonction glutamatergique (Averill & Abdallah, 2022 ; Prajapati et al., 2025), en particulier lors de la réactivation traumatique ou de l'hypervigilance. Cela conduit clairement à des réponses émotionnelles excessives, à un échec de la régulation NMDA-r pour éteindre la peur et à un hyper-codage sensorielle dans lequel des stimuli neutres deviennent saillants en rappelant le traumatisme. Mais le SoA ne serait que peu altéré car les mécanismes de prédiction et d'atténuation sensorielle sont réservés.

Une vaste méta-analyse indique que la dissociation varie dimensionnellement tant en intensité qu'en gravité, allant du TSPT simple au TSPT de sous-type dissociatif, et atteignant ses niveaux les plus élevés dans le trouble dissociatif de l'identité (Lyssenko et al., 2018). La perspective dimensionnelle est cohérente avec le phénomène de « *kindling* » proposé, c'est à dire un seuil dissociatif de plus en plus bas en fonction de la durée et de la gravité des expositions traumatiques et des phénomènes dissociatifs (Bob, 2008). Considérant tous ces éléments, nous proposons une classification dimensionnelle des troubles de la conscience corporelle dans le TSPT en fonction du sous-type dissociatif dans la Figure 5. Ce modèle original se caractérise par une inversion de la hiérarchie bayésienne entre le TSPT non dissociatif (avec des croyances « *prior* » plus fiables que la probabilité des entrées sensorielles « *likehihood* ») et le TSPT de sous-type dissociatif qui a profil de fiabilité inverse (la certitude des entrées sensorielles « *likehihood* » est plus fiable que les croyances antérieures « *prior* »). Dans notre modèle, nous soutenons que les symptômes de Schneider représentent la dimension la plus extrême des troubles de la conscience corporelle. En 1959, Kurt Schneider a décrit un ensemble de symptômes qu'il considérait comme pathognomoniques de la schizophrénie, appelés plus tard symptômes de premier rang (*First Rank Symptoms*, FRS), et qui inclue les hallucinations auditives de commentaires et de discussion, le syndrome d'influence et les idées délirantes de vol, de diffusion, de lecture ou d'insertion de pensées

(Schneider, 1959). Des recherches ultérieures ont démontré que les FRS ne sont pas spécifiques à la schizophrénie car ils apparaissent également dans d'autres troubles psychiatriques, en particulier les troubles dissociatifs (Soares-Weiser et al., 2015). Sur le plan conceptuel, les symptômes schneidériens peuvent être compris comme des expressions cliniques de troubles graves de la conscience de soi (Franck, 2004 ; Lake, 2012 ; Waters & Badcock, 2010). Par exemple, dans la dépersonnalisation, le sentiment d'étrangeté lié aux mouvements volontaires peut conduire à une incapacité à reconnaître ses propres actions (se manifestant par des syndromes d'influence ou des symptômes de passivité), tandis que les pensées peuvent être perçues comme étrangères à soi-même (conduisant à des hallucinations auditives de conversations ou de commentaires). De même, l'instabilité du moi corporel par rapport à la réalité extérieure dans la déréalisation peut entraîner une fonte des limites psychiques produisant des idées délirantes de vol, de diffusion, de lecture ou d'insertion de pensées. En reliant ces phénomènes à la neurobiologie et au TSPT, plusieurs études ont montré que l'intensité des symptômes schneidériens dans la schizophrénie est corrélée à l'hyperactivité du gyrus angulaire droit (Farrer et al., 2003 ; Koreki et al., 2019 ; Spence et al., 1997) ou à des dysfonctionnements NMDA-r / glutamate (Adams et al., 2013 ; Fletcher & Frith, 2009 ; Uno & Coyle, 2019).

Figure 5 : Modèle dimensionnel des troubles de la conscience du corps dans le trouble de stress post-traumatique et son sous-type dissociatif



Abréviations : PTSD: Post-Traumatic Stress Disorder, P: trauma-related prior, L: Likelihood, SBO: Sense of Body Ownership, SoA: Sense of Agency.

7. Implications thérapeutiques

Nous avons proposé d'intégrer les troubles de la conscience corporelle dans les modèles explicatifs du TSPT et de son sous-type dissociatif *via* à la théorie prédictive. Grâce à ces hypothèses innovantes traitant des liens entre la prédiction, la perception et la conscience corporelle dans le TSPT, différentes approches thérapeutiques peuvent être envisagées, soit de manière descendante (« *top-down* »), en rétablissant le système perceptif-prédictif afin d'améliorer la conscience corporelle, soit de

manière ascendante (« *bottom-up* »), en améliorant la conscience corporelle afin de rétablir le système perceptif-prédictif. La combinaison des deux approches doit également être envisagée.

Dans une approche descendante, l'une des premières lignes de traitement à envisager viserait à modifier les croyances du sujet, notamment en mettant en œuvre des thérapies déjà reconnues comme efficaces dans le TSPT (thérapie cognitive, thérapie d'exposition prolongée, thérapie de traitement cognitif et thérapie d'exposition narrative) mais en essayant de mieux se concentrer sur la mise à jour des croyances altérées après un psychotraumatisme (Kube et al., 2020). L'évolution récente de la pharmacologie avec l'avènement des psychédéliques ouvre de grandes possibilités pour modifier les croyances des personnes souffrant d'un TSPT. Récemment, une étude de cas contrôlée chez des patients souffrant de dépression résistante a montré que la mise à jour des croyances était biaisée vers des signaux positifs après une première perfusion de kétamine (Bottemanne et al., 2022), un résultat intéressant compte tenu du biais affectif de la mise à jour des croyances dans le TSPT (Garrett et al., 2018). Compte tenu de l'intérêt croissant pour l'efficacité et la sécurité de la kétamine dans le TSPT (Feder et al., 2021), il serait très pertinent d'évaluer les effets de la kétamine sur les croyances liées au psychotraumatisme. D'autres approches pharmacologiques ont également été étudiées avec des thérapies augmentées utilisant la psilocybine, le LSD (acide lysergique diéthylamide) ou la MDMA (méthylène-dioxy-méthamphétamine) (Mohamed et al., 2022). Les psychédéliques peuvent modifier les croyances, mais la question de savoir s'ils peuvent induire de nouvelles croyances ou plutôt modifier l'impact des affects et des suggestions des autres sur la façon dont les croyances sont imputées fait encore débat (McGovern et al., 2022). En combinaison avec la psychothérapie (thérapie assistée par psychédéliques) (Averill & Abdallah, 2022 ; Mitchell et al., 2021), l'utilisation de psychédéliques pour améliorer le système de croyances altéré dans le TSPT semble être une perspective intéressante à explorer dans l'avenir. Il convient de tenir compte de l'impact bénéfique et potentiel que ces thérapies pourraient avoir sur la conscience corporelle grâce à leurs effets directs sur la restauration du système de prédiction-perception, mais aussi grâce à leurs impacts bénéfiques indirects qui amélioreraient les facteurs d'influence de la conscience corporelle, tels que la douleur (Castellanos et al., 2020 ; Michelet et al., 2018), l'anxiété et la dépression (Muttoni et al., 2019 ; Rothärmel et al., 2022).

Dans une approche ascendante, plusieurs approches thérapeutiques visent à améliorer la conscience corporelle afin d'atténuer les symptômes du TSPT. Les interventions axées sur le corps et le mouvement (*Body- and Movement-Oriented Interventions*, BMOIs) sont définis comme des thérapies dans lesquelles l'activité physique et l'expérience corporelle occupent une place centrale (Probst, 2010). On peut citer comme exemples la psychothérapie sensorimotrice (Langmuir et al., 2012), l'expérience somatique (Levine, 2010), la psychothérapie axée sur le corps (Röhricht, 2009) et la thérapie psychomotrice (Probst, 2010). Les données disponibles suggèrent que les BMOIs peuvent améliorer la conscience corporelle (Probst, 2010 ; Röhricht, 2009) et réduire les symptômes du TSPT (Van de Kamp et al., 2019). Leurs effets thérapeutiques peuvent être médiés plus directement par l'activation de structures cérébrales phylogénétiquement plus anciennes impliquées dans le TSPT, telles que l'amygdale (Van der Kolk, 2014). Contrairement aux psychothérapies convention-

nelles qui mobilisent principalement les régions corticales les plus récentes phylogénétiquement, comme le CPF (Ogden et al., 2006), les BMOIs agissent sur le système nerveux autonome, en particulier le nerf vague et ses voies réciproques reliant le corps et le cerveau (Routledge et al., 2010 ; Thayer & Lane, 2009), couplant ainsi les signaux intéroceptifs aux systèmes limbique et amygdalien afin d'améliorer la régulation des émotions (Mackenzie et al., 2014). Plus généralement, l'activité physique améliore la conscience corporelle en augmentant la précision des entrées sensorielles grâce à la focalisation attentionnelle, l'ampleur de cet effet variant selon le type d'activité physique pratiquée (Legrand & Ravn, 2009 ; Virtanen et al., 2022). Cette précision accrue peut contrebalancer les croyances antérieures rigides et hyperprécises dans le TSPT, encourageant ainsi leur mise à jour grâce à des expériences corporelles nouvelles et plus précises. Cela suggère que l'activité physique représente un traitement prometteur pour le TSPT (Oppizzi & Umberger, 2018), en particulier lorsqu'elle est adaptée à des programmes personnalisés en fonction du type de TSPT. Enfin, les techniques de neuromodulation constituent une option thérapeutique complémentaire et non invasive. Ces approches utilisent des champs magnétiques ou électriques faibles pour moduler l'activité dans des régions ciblées du cerveau et leurs réseaux fonctionnellement connectés (Hallett, 2000 ; Yamada & Sumiyoshi, 2021). Dans le cas du TSPT, la plupart des études se sont concentrées sur la stimulation du cortex préfrontal pendant les tâches d'exposition afin de favoriser l'extinction de la peur (Kan et al., 2020). Cependant, les techniques de neuro-modulation pourraient cibler des zones d'intérêt dans la conscience corporelle, telles que la jonction temporo-pariétale droite qu'une méta-analyse récente a identifiée comme une cible efficace de la stimulation magnétique transcrânienne pour réduire les syndromes de dépersonnalisation et de déréalisation (Orrù et al., 2021).

Conflits d'intérêts : Aucun

Financement : Aucun

Bibliographie

Adams, R. A., Stephan, K. E., Brown, H. R., Frith, C. D., & Friston, K. J. (2013). The computational anatomy of psychosis. Frontiers in Psychiatry, 4, 47. https://doi.org/10.3389/fpsyt.2013.00047

Adrien, V., Trousselard, M., & Schoeller, F. (2023). Agency in Post-traumatic Stress Disorder: Implications for Therapy. OSF. https://doi.org/10.31234/osf.io/j2pwk

American Psychiatric Association. (2013). Diagnostic and statistical manual of mental disorders (DSM-5®). American Psychiatric Pub.

Amo, R., Uchida, N., & Watabe-Uchida, M. (2024). Glutamate inputs send prediction error of reward, but not negative value of aversive stimuli, to dopamine neurons. Neuron, 112(6), 1001-1019.e6. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2023.12.019

Ataria, Y. (2015). Sense of ownership and sense of agency during trauma. Phenomenology and the Cognitive Sciences, 14(1), 199–212. https://doi.org/10.1007/s11097-013-9334-y

Auxéméry, Y. (2012). The different ‘“voices”’ of PTSD. From linguistic desert to psychotherapy. Annales Médico-psychologiques, revue psychiatrique, 170(5), 306–311. https://doi.org/10.1016/j.amp.2011.03.017

Averill, L. A., & Abdallah, C. G. (2022). Investigational drugs for assisting psychotherapy for posttraumatic stress disorder (PTSD): Emerging approaches and shifting paradigms in the era of psychedelic medicine. Expert Opinion on Investigational Drugs, 31(2), 133–137. https://doi.org/10.1080/13543784.2022.2035358

Bao, W., Gao, Y., Cao, L., Li, H., Liu, J., Liang, K., Hu, X., Zhang, L., Hu, X., Gong, Q., & Huang, X. (2021). Alterations in large-scale functional networks in adult posttraumatic stress disorder: A systematic review and meta-analysis of resting-state functional connectivity studies. Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 131, 1027–1036. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.10.017

Barrett, L. F., & Simmons, W. K. (2015). Interoceptive predictions in the brain. Nature Reviews. Neuroscience, 16(7), 419–429. https://doi.org/10.1038/nrn3950

Blakemore, S. J., Wolpert, D., & Frith, C. (2000). Why can't you tickle yourself? Neuroreport, 11(11), R11-16. https://doi.org/10.1097/00001756-200008030-00002

Blanke, O. (2012). Multisensory brain mechanisms of bodily self-consciousness. Nature Reviews. Neuroscience, 13(8), 556–571. https://doi.org/10.1038/nrn3292

Blanke, O., Ortigue, S., Landis, T., & Seeck, M. (2002). Stimulating illusory own-body perceptions. Nature, 419(6904), 269–270. https://doi.org/10.1038/419269a

Bob, P. (2008). Pain, dissociation and subliminal self-representations. Consciousness and Cognition, 17(1), 355–369. https://doi.org/10.1016/j.concog.2007.12.001

Bogousslavsky, J. (2017). Neurologic-Psychiatric Syndromes in Focus - Part I: From Neurology to Psychiatry. Karger Medical and Scientific Publishers.

Bonanno, G. A., Westphal, M., & Mancini, A. D. (2011). Resilience to Loss and Potential Trauma. Annual Review of Clinical Psychology, 7(1), 511–535. https://doi.org/10.1146/annurev-clinpsy-032210-104526

Borenstein, M. (2016). Chapitre 12. ESPT, facteurs de risques, facteurs de protection: État des lieux et prévention. In Stress, burn-out, harcèlement moral (pp. 163–180). Dunod. https://www.cairn.info/stress-burnout-harcelement-moral--9782100743353-page-163.htm

Boroujeni, K. B., & Womelsdorf, T. (2023). Routing states transition during oscillatory bursts and attentional selection. Neuron, 111(18), 2929-2944.e11. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2023.06.012

Bottemanne, H. (2025). Bayesian brain theory: Computational neuroscience of belief. Neuroscience, 566, 198–204. https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2024.12.003

Bottemanne, H., Morlaas, O., Claret, A., Sharot, T., Fossati, P., & Schmidt, L. (2022). Evaluation of Early Ketamine Effects on Belief-Updating Biases in Patients With Treatment-Resistant Depression. JAMA Psychiatry, 79(11), 1124–1132. https://doi.org/10.1001/jamapsychiatry.2022.2996

Botvinick, M., & Cohen, J. (1998). Rubber hands "feel" touch that eyes see. Nature, 391(6669), 756. https://doi.org/10.1038/35784

Boudoukha, A. H. (2020). Burn-out et stress post-traumatique (2nd edition). Dunod.

Braun, N., Debener, S., Spychala, N., Bongartz, E., Sörös, P., Müller, H. H. O., & Philipsen, A. (2018). The Senses of Agency and Ownership: A Review. Frontiers in Psychology, 9, 535. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00535

Brewer, B. (1995). Bodily Awareness and the Self. In J. L. Bermudez, A. J. Marcel, & N. M. Eilan (Eds.), The Body and the Self (pp. 291–303). Cambridge: Mass: Mit Press.

Brewin, C. R. (2015). Re-experiencing traumatic events in PTSD: New avenues in research on intrusive memories and flashbacks. European Journal of Psychotraumatology, 6(1), 27180. https://doi.org/10.3402/ejpt.v6.27180

Brown, L. A., Belli, G. M., Asnaani, A., & Foa, E. B. (2019). A Review of the Role of Negative Cognitions About Oneself, Others, and the World in the Treatment of PTSD. Cognitive Therapy and Research, 43(1), 143–173. https://doi.org/10.1007/s10608-018-9938-1

Brown, W. J., Hetzel-Riggin, M. D., Mitchell, M. A., & Bruce, S. E. (2021). Rumination Mediates the Relationship Between Negative Affect and Posttraumatic Stress Disorder Symptoms in Female Interpersonal Trauma Survivors. Journal of Interpersonal Violence, 36(13–14), 6418–6439. https://doi.org/10.1177/0886260518818434

Cai, X., Pu, C., Zhou, S., Wang, Y., Huang, J., Lui, S. S. Y., Møller, A., Cheung, E. F. C., Madsen, K. H., Xue, R., Yu, X., & Chan, R. C. K. (2023). Anterior cingulate glutamate levels associate with functional activation and connectivity during sensory integration in schizophrenia: A multimodal 1H-MRS and fMRI study. Psychological Medicine, 53(11), 4904–4914. https://doi.org/10.1017/S0033291722001817

Cameron, O. G. (2001). Interoception: The Inside Story—A Model for Psychosomatic Processes. *Biopsychosocial Science and Medicine*, *63*(5), 697.

Castellanos, J. P., Woolley, C., Bruno, K. A., Zeidan, F., Halberstadt, A., & Furnish, T. (2020). Chronic pain and psychedelics: A review and proposed mechanism of action. *Regional Anesthesia & Pain Medicine*, *45*(7), 486–494. https://doi.org/10.1136/rapm-2020-101273

Chang, J.-C., Yen, A. M.-F., Chen, H.-H., Chen, S. L.-S., Chiu, S. Y.-H., Fann, J. C.-Y., & Lee, C.-S. (2017). Comorbid diseases as risk factors for incident posttraumatic stress disorder (PTSD) in a large community cohort (KCIS no.PSY4). *Scientific Reports*, *7*(1), Article 1. https://doi.org/10.1038/srep41276

Clark, J. E., Watson, S., & Friston, K. J. (2018). What is mood? A computational perspective. *Psychological Medicine*, *48*(14), 2277–2284. https://doi.org/10.1017/S0033291718000430

Coppi, S., Jensen, K. B., & Ehrsson, H. H. (2025). Feeling pain from a rubber hand: Nociceptive drift in the rubber hand illusion. *iScience*, *28*(6). https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.112690

Cougle, J. R., Kilpatrick, D. G., & Resnick, H. S. (2012). Defining Traumatic Events: Research Findings and Controversies. In J. G. Beck & D. M. Sloan (Eds.), *The Oxford Handbook of Traumatic Stress Disorders* (pp. 10–27). Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780195399066.013.0002

Craig, A. D. B. (2009). How do you feel--now? The anterior insula and human awareness. *Nature Reviews. Neuroscience*, *10*(1), 59–70. https://doi.org/10.1038/nrn2555

Creamer, M., McFarlane, A. C., & Burgess, P. (2005). Psychopathology following trauma: The role of subjective experience. *Journal of Affective Disorders*, *86*(2–3), 175–182. https://doi.org/10.1016/j.jad.2005.01.015

Dalgleish, T. (2004). Cognitive approaches to posttraumatic stress disorder: The evolution of multirepresentational theorizing. *Psychological Bulletin*, *130*(2), 228–260. https://doi.org/10.1037/0033-2909.130.2.228

de Boer, D. M. L., Johnston, P. J., Kerr, G., Meinzer, M., & Cleeremans, A. (2020). A causal role for the right angular gyrus in self-location mediated perspective taking. *Scientific Reports*, *10*(1), 19229. https://doi.org/10.1038/s41598-020-76235-7

Ehlers, A., Hackmann, A., & Michael, T. (2004). Intrusive re-experiencing in post-traumatic stress disorder: Phenomenology, theory, and therapy. *Memory*, *12*(4), 403–415. https://doi.org/10.1080/09658210444000025

Ehrsson, H. H. (2020). Multisensory processes in body ownership. In *Multisensory Perception* (pp. 179–200). Elsevier.

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

Farrer, C., & Frith, C. D. (2002a). Experiencing oneself vs another person as being the cause of an action: The neural correlates of the experience of agency. *NeuroImage*, *15*(3), 596–603. https://doi.org/10.1006/nimg.2001.1009

Farrer, C., & Frith, C. D. (2002b). Experiencing oneself vs another person as being the cause of an action: The neural correlates of the experience of agency. *NeuroImage*, *15*(3), 596–603. https://doi.org/10.1006/nimg.2001.1009

Fazekas, P., & Nanay, B. (2021). Attention Is Amplification, Not Selection. *The British Journal for the Philosophy of Science*, *72*(1), 299–324. https://doi.org/10.1093/bjps/axy065

Feder, A., Costi, S., Rutter, S. B., Collins, A. B., Govindarajulu, U., Jha, M. K., Horn, S. R., Kautz, M., Corniquel, M., Collins, K. A., Bevilacqua, L., Glasgow, A. M., Brallier, J., Pietrzak, R. H., Murrough, J. W., & Charney, D. S. (2021). A Randomized Controlled Trial of Repeated Ketamine Administration for Chronic Posttraumatic Stress Disorder. *The American Journal of Psychiatry*, *178*(2), 193–202. https://doi.org/10.1176/appi.ajp.2020.20050596

Fletcher, P. C., & Frith, C. D. (2009). Perceiving is believing: A Bayesian approach to explaining the positive symptoms of schizophrenia. *Nature Reviews. Neuroscience*, *10*(1), 48–58. https://doi.org/10.1038/nrn2536

Fleurkens, P. F. T. (2021). *Genetics, childhood trauma, and biased information processing as risk factors for mental disorders* [PhD Thesis, Netherland]. https://repository.ubn.ru.nl/bitstream/handle/2066/233040/233040.pdf?sequence=1

Franck, N. (2004). Les symptômes de premier rang de la schizophrénie: De la clinique à l'approche expérimentale. *PSN*, *2*(1), 10–25.

Fried, I., Mukamel, R., & Kreiman, G. (2011). Internally generated preactivation of single neurons in human medial frontal cortex predicts volition. *Neuron*, *69*(3), 548–562. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2010.11.045

Friston, K. (2005). A theory of cortical responses. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *360*(1456), 815–836. https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1622

Friston, K. (2011). Embodied inference: Or "I think therefore I am, if I am what I think." In *The implications of embodiment: Cognition and communication* (pp. 89–125). Imprint Academic.

Frith, C. (2012). Explaining delusions of control: The comparator model 20 years on. *Consciousness and Cognition*, *21*(1), 52–54. https://doi.org/10.1016/j.concog.2011.06.010

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

Galatzer-Levy, I. R., Huang, S. H., & Bonanno, G. A. (2018). Trajectories of resilience and dysfunction following potential trauma: A review and statistical evaluation. *Clinical Psychology Review*, *63*, 41–55. https://doi.org/10.1016/j.cpr.2018.05.008

Gallagher, M., Colzi, C., & Sedda, A. (2021). Dissociation of proprioceptive drift and feelings of ownership in the somatic rubber hand illusion. *Acta Psychologica*, *212*, 103192. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2020.103192

Gallagher, S. (2000). Philosophical conceptions of the self: Implications for cognitive science. *Trends in Cognitive Sciences*, *4*(1), 14–21. https://doi.org/10.1016/S1364-6613(99)01417-5

Garfinkel, S. N., Seth, A. K., Barrett, A. B., Suzuki, K., & Critchley, H. D. (2015). Knowing your own heart: Distinguishing interoceptive accuracy from interoceptive awareness. *Biological Psychology*, *104*, 65–74. https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2014.11.004

Garrett, N., González-Garzón, A. M., Foulkes, L., Levita, L., & Sharot, T. (2018). Updating Beliefs under Perceived Threat. *Journal of Neuroscience*, *38*(36), 7901–7911. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0716-18.2018

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

Hallett, M. (2000). Transcranial magnetic stimulation and the human brain. *Nature*, *406*(6792), 147–150. https://doi.org/10.1038/35018000

Heydrich, L., Lopez, C., Seeck, M., & Blanke, O. (2011). Partial and full own-body illusions of epileptic origin in a child with right temporoparietal epilepsy. *Epilepsy & Behavior*, *20*(3), 583–586. https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2011.01.008

Hopper, J. W., Frewen, P. A., van der Kolk, B. A., & Lanius, R. A. (2007). Neural correlates of reexperiencing, avoidance, and dissociation in PTSD: Symptom dimensions and emotion dysregulation in responses to script-driven trauma imagery. *Journal of Traumatic Stress*, *20*(5), 713–725. https://doi.org/10.1002/jts.20284

Ionta, S., Heydrich, L., Lenggenhager, B., Mouthon, M., Fornari, E., Chapuis, D., Gassert, R., & Blanke, O. (2011). Multisensory mechanisms in temporo-parietal cortex support self-location and first-person perspective. *Neuron*, *70*(2), 363–374. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.03.009

Janoff-Bulman, R. (2004). Posttraumatic growth: Three explanatory models. *Psychological Inquiry*, *15*(1), 30–34.

Joshi, S. A., Aupperle, R. L., & Khalsa, S. S. (2023). Interoception in Fear Learning and Posttraumatic Stress Disorder. *Focus*, *21*(3), 266–277. https://doi.org/10.1176/appi.focus.20230007

Kan, R. L. D., Zhang, B. B. B., Zhang, J. J. Q., & Kranz, G. S. (2020). Non-invasive brain stimulation for posttraumatic stress disorder: A systematic review and meta-analysis. *Translational Psychiatry*, *10*(1), 168. https://doi.org/10.1038/s41398-020-0851-5

Kanai, R., Komura, Y., Shipp, S., & Friston, K. (2015). Cerebral hierarchies: Predictive processing, precision and the pulvinar. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, *370*(1668), 20140169. https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0169

Kaneno, Y., Pasqualotto, A., & Ashida, H. (2024). Influence of interoception and body movement on the rubber hand illusion. *Frontiers in Psychology*, *15*. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1458726

Kessler, R. C., Avenevoli, S., Costello, J., Green, J. G., Gruber, M. J., McLaughlin, K. A., Petukhova, M., Sampson, N. A., Zaslavsky, A. M., & Merikangas, K. R. (2012). Severity of 12-month DSM-IV disorders in the National Comorbidity Survey Replication Adolescent Supplement. *Archives of General Psychiatry*, *69*(4), 381–389. https://doi.org/10.1001/archgenpsychiatry.2011.1603

Kessler, R. C., Sonnega, A., Bromet, E., Hughes, M., & Nelson, C. B. (1995). Posttraumatic stress disorder in the National Comorbidity Survey. *Archives of General Psychiatry*, *52*(12), 1048–1060. https://doi.org/10.1001/archpsyc.1995.03950240066012

Knill, D. C., & Pouget, A. (2004). The Bayesian brain: The role of uncertainty in neural coding and computation. *Trends in Neurosciences*, *27*(12), 712–719. https://doi.org/10.1016/j.tins.2004.10.007

Koenen, K. C., Ratanatharathorn, A., Ng, L., McLaughlin, K. A., Bromet, E. J., Stein, D. J., Karam, E. G., Meron Ruscio, A., Benjet, C., Scott, K., Atwoli, L., Petukhova, M., Lim, C. C. W., Aguilar-Gaxiola, S., Al-Hamzawi, A., Alonso, J., Bunting, B., Ciutan, M., de Girolamo, G., … Kessler, R. C. (2017). Posttraumatic stress disorder in the World Mental Health Surveys. *Psychological Medicine*, *47*(13), 2260–2274. https://doi.org/10.1017/S0033291717000708

Koreki, A., Maeda, T., Okimura, T., Terasawa, Y., Kikuchi, T., Umeda, S., Nishikata, S., Yagihashi, T., Kasahara, M., Nagai, C., Moriyama, Y., Den, R., Watanabe, T., Kikumoto, H., Kato, M., & Mimura, M. (2019). Dysconnectivity of the Agency Network in Schizophrenia: A Functional Magnetic Resonance Imaging Study. *Frontiers in Psychiatry*, *10*, 171. https://doi.org/10.3389/fpsyt.2019.00171

Köster, M., Kayhan, E., Langeloh, M., & Hoehl, S. (2020). Making Sense of the World: Infant Learning From a Predictive Processing Perspective. *Perspectives on Psychological Science: A Journal of the Association for Psychological Science*, *15*(3), 562–571. https://doi.org/10.1177/1745691619895071

Kube, T., Berg, M., Kleim, B., & Herzog, P. (2020). Rethinking post-traumatic stress disorder—A predictive processing perspective. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *113*, 448–460. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2020.04.014

Kube, T., & Rozenkrantz, L. (2021). When Beliefs Face Reality: An Integrative Review of Belief Updating in Mental Health and Illness. *Perspectives on Psychological Science: A Journal of the Association for Psychological Science*, *16*(2), 247–274. https://doi.org/10.1177/1745691620931496

Lake, C. R. (2012). Kurt Schneider (1887–1967): First-and Second-Rank Symptoms, Not Pathognomonic of Schizophrenia, Explained by Psychotic Mood Disorders. In *Schizophrenia is a Misdiagnosis* (pp. 137–150). Springer.

Langmuir, J. I., Kirsh, S. G., & Classen, C. C. (2012). A pilot study of body-oriented group psychotherapy: Adapting sensorimotor psychotherapy for the group

treatment of trauma. *Psychological Trauma: Theory, Research, Practice, and Policy*, *4*, 214–220. https://doi.org/10.1037/a0025588

Lanius, R. A., Frewen, P. A., Girotti, M., Neufeld, R. W. J., Stevens, T. K., & Densmore, M. (2007). Neural correlates of trauma script-imagery in posttraumatic stress disorder with and without comorbid major depression: A functional MRI investigation. *Psychiatry Research*, *155*(1), 45–56. https://doi.org/10.1016/j.pscychresns.2006.11.006

Laurin, A., Ramoz, N., Ameller, A., Dereux, A., Zajac, J., Tébéka, S., Le Strat, Y., & Dubertret, C. (2021). Self-recognition impairments in schizophrenia with and without first rank symptoms using the moving rubber hand illusion. *Consciousness and Cognition*, *93*(103154). https://doi.org/10.1016/j.concog.2021.103154

Lebois, L. A. M., Harnett, N. G., van Rooij, S. J. H., Ely, T. D., Jovanovic, T., Bruce, S. E., House, S. L., Ravichandran, C., Dumornay, N. M., Finegold, K. E., Hill, S. B., Merker, J. B., Phillips, K. A., Beaudoin, F. L., An, X., Neylan, T. C., Clifford, G. D., Linnstaedt, S. D., Germine, L. T., … Ressler, K. J. (2022). Persistent Dissociation and Its Neural Correlates in Predicting Outcomes After Trauma Exposure. *The American Journal of Psychiatry*, *179*(9), 661–672. https://doi.org/10.1176/appi.ajp.21090911

Leech, K., Stapleton, P., & Patching, A. (2024). A roadmap to understanding interoceptive awareness and post-traumatic stress disorder: A scoping review. *Frontiers in Psychiatry*, *15*. https://doi.org/10.3389/fpsyt.2024.1355442

Legrand, D. (2005). Le soi corporel. *L'Évolution Psychiatrique*, *70*(4), 709–719. https://doi.org/10.1016/j.evopsy.2005.07.005

Legrand, D., & Ravn, S. (2009). Perceiving subjectivity in bodily movement: The case of dancers. *Phenomenology and the Cognitive Sciences*, *8*(3), 389–408. https://doi.org/10.1007/s11097-009-9135-5

Levine, P. A. (2010). *In an unspoken voice: How the body releases trauma and restores goodness*. North Atlantic Books.

Levit-Binnun, N., Davidovitch, M., & Golland, Y. (2013). Sensory and motor secondary symptoms as indicators of brain vulnerability. *Journal of Neurodevelopmental Disorders*, *5*(1), 26. https://doi.org/10.1186/1866-1955-5-26

Lindström, L., Kajonius, P., & Cardeña, E. (2022). Dissolution of What? The Self Lost in Self-transcendent Experiences. *Journal of Consciousness Studies*, *29*(5–6), 75–101. https://doi.org/10.53765/20512201.29.5.075

Litwin, P. (2020). Extending Bayesian Models of the Rubber Hand Illusion. *Multisensory Research*, *33*(2), 127–160. https://doi.org/10.1163/22134808-20191440

Longo, M. R., Schüür, F., Kammers, M. P. M., Tsakiris, M., & Haggard, P. (2008). What is embodiment? A psychometric approach. *Cognition*, *107*(3), 978–998. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2007.12.004

Lyssenko, L., Schmahl, C., Bockhacker, L., Vonderlin, R., Bohus, M., & Kleindienst, N. (2018). Dissociation in Psychiatric Disorders: A Meta-Analysis of Studies Using the Dissociative Experiences Scale. *The American Journal of Psychiatry*, *175*(1), 37–46. https://doi.org/10.1176/appi.ajp.2017.17010025

Mackenzie, M. J., Carlson, L. E., Paskevich, D. M., Ekkekakis, P., Wurz, A. J., Wytsma, K., Krenz, K. A., McAuley, E., & Culos-Reed, S. N. (2014). Associations between attention, affect and cardiac activity in a single yoga session for female cancer survivors: An enactive neurophenomenology-based approach. *Consciousness and Cognition*, *27*, 129–146. https://doi.org/10.1016/j.concog.2014.04.005

McGovern, H. T., Leptourgos, P., Hutchinson, B. T., & Corlett, P. R. (2022). Do psychedelics change beliefs? *Psychopharmacology*, *239*(6), 1809–1821. https://doi.org/10.1007/s00213-022-06153-1

McKay, C., Storm, E., Castagna, P., Singer, J. A., & Conway, M. A. (2024). Psychological Disorders and Autobiographical Memories: Examining Memory Specificity, Affective Content, and Meaning-Making. In A. L. Mishara, M. Moskalewicz, M. A. Schwartz, & A. Kranjec (Eds.), *Phenomenological Neuropsychiatry: How Patient Experience Bridges the Clinic with Clinical Neuroscience* (pp. 231–252). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-38391-5_17

Mehling, W. E., Gopisetty, V., Daubenmier, J., Price, C. J., Hecht, F. M., & Stewart, A. (2009). Body Awareness: Construct and Self-Report Measures. *PLOS ONE*, *4*(5), e5614. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0005614

Meldrum, B. S. (2000). Glutamate as a Neurotransmitter in the Brain: Review of Physiology and Pathology. *The Journal of Nutrition*, *130*(4), 1007S-1015S. https://doi.org/10.1093/jn/130.4.1007S

Menon, V. (2021). Dissociation by Network Integration. *American Journal of Psychiatry*, *178*(2), 110–112. https://doi.org/10.1176/appi.ajp.2020.20121728

Michael, T., Halligan, S. L., Clark, D. M., & Ehlers, A. (2007). Rumination in posttraumatic stress disorder. *Depression and Anxiety*, *24*(5), 307–317. https://doi.org/10.1002/da.20228

Michelet, D., Brasher, C., Horlin, A.-L., Bellon, M., Julien-Marsollier, F., Vacher, T., Pontone, S., & Dahmani, S. (2018). Ketamine for chronic non-cancer pain: A meta-analysis and trial sequential analysis of randomized controlled trials. *European Journal of Pain (London, England)*, *22*(4), 632–646. https://doi.org/10.1002/ejp.1153

Mitchell, J. M., Bogenschutz, M., Lilienstein, A., Harrison, C., Kleiman, S., Parker-Guilbert, K., Ot'alora G., M., Garas, W., Paleos, C., Gorman, I., Nicholas, C., Mithoefer, M., Carlin, S., Poulter, B., Mithoefer, A., Quevedo, S., Wells, G., Klaire, S. S., van der Kolk, B., … Doblin, R. (2021). MDMA-assisted therapy for severe PTSD: A randomized, double-blind, placebo-controlled phase 3 study. *Nature Medicine*, *27*(6), Article 6. https://doi.org/10.1038/s41591-021-01336-3

Mohamed, A., Touheed, S., Ahmed, M., Hor, M., & Fatima, S. (2022). The Efficacy of Psychedelic-Assisted Therapy in Managing Post-traumatic Stress Disorder (PTSD): A New Frontier? *Cureus*, *14*(10), e30919. https://doi.org/10.7759/cureus.30919

Mohanta, S., Afrasiabi, M., Casey, C. P., Tanabe, S., Redinbaugh, M. J., Kambi, N. A., Phillips, J. M., Polyakov, D., Filbey, W., Austerweil, J. L., Sanders, R. D., & Saalmann, Y. B. (2021). Predictive Feedback, Early Sensory Representations, and Fast Responses to Predicted Stimuli Depend on NMDA Receptors. *Journal of Neuroscience*, *41*(49), 10130–10147. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1311-21.2021

Montague, P. R., Dolan, R. J., Friston, K. J., & Dayan, P. (2012). Computational psychiatry. *Trends in Cognitive Sciences*, *16*(1), 72–80. https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.11.018

Moore, J. W. (2016). What is the sense of agency and why does it matter? *Frontiers in Psychology*, *7*, 209433.

Morgan, H. L., Turner, D. C., Corlett, P. R., Absalom, A. R., Adapa, R., Arana, F. S., Pigott, J., Gardner, J., Everitt, J., Haggard, P., & Fletcher, P. C. (2011). Exploring the impact of ketamine on the experience of illusory body ownership. *Biological Psychiatry*, *69*(1), 35–41. https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2010.07.032

Murphy, J., Catmur, C., & Bird, G. (2019). Classifying individual differences in interoception: Implications for the measurement of interoceptive awareness. *Psychonomic Bulletin & Review*, *26*(5), 1467–1471. https://doi.org/10.3758/s13423-019-01632-7

Murphy, R. J. (2023). Depersonalization/Derealization Disorder and Neural Correlates of Trauma-related Pathology: A Critical Review. *Innovations in Clinical Neuroscience*, *20*(1–3), 53–59.

Muttoni, S., Ardissino, M., & John, C. (2019). Classical psychedelics for the treatment of depression and anxiety: A systematic review. *Journal of Affective Disorders*, *258*, 11–24. https://doi.org/10.1016/j.jad.2019.07.076

NICE. (2018, December 5). *Overview | Post-traumatic stress disorder | Guidance | NICE*. NICE. https://www.nice.org.uk/guidance/ng116

Nicholson, A. A., Sapru, I., Densmore, M., Frewen, P. A., Neufeld, R. W. J., Théberge, J., McKinnon, M. C., & Lanius, R. A. (2016). Unique insula subregion resting-state functional connectivity with amygdala complexes in posttraumatic stress disorder and its dissociative subtype. *Psychiatry Research. Neuroimaging*, *250*, 61–72. https://doi.org/10.1016/j.pscychresns.2016.02.002

Noorman, S., Stein, T., Zantvoord, J., Fahrenfort, J., & van Gaal, S. (2025). A causal role of the NMDA receptor in recurrent processing during perceptual integration. *eLife*, *13*, RP100530. https://doi.org/10.7554/eLife.100530

Ogden, P., Pain, C., & Fisher, J. (2006). A Sensorimotor Approach to the Treatment of Trauma and Dissociation. *Psychiatric Clinics*, *29*(1), 263–279. https://doi.org/10.1016/j.psc.2005.10.012

Oppizzi, L. M., & Umberger, R. (2018). The Effect of Physical Activity on PTSD. *Issues in Mental Health Nursing*, *39*(2), 179–187. https://doi.org/10.1080/01612840.2017.1391903

Orcutt, H. K., Reffi, A. N., & Ellis, R. A. (2020). Experiential avoidance and PTSD. In *Emotion in Posttraumatic Stress Disorder* (pp. 409–436). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816022-0.00014-4

Orrù, G., Bertelloni, D., Cesari, V., Conversano, C., & Gemignani, A. (2021). Targeting temporal parietal junction for assessing and treating disembodiment phenomena: A systematic review of TMS effect on depersonalization and derealization disorders (DPD) and body illusions. *AIMS Neuroscience*, *8*(2), 181–194. https://doi.org/10.3934/Neuroscience.2021009

Paulus, M. P., Feinstein, J. S., & Khalsa, S. S. (2019). An Active Inference Approach to Interoceptive Psychopathology. *Annual Review of Clinical Psychology*, *15*, 97–122. https://doi.org/10.1146/annurev-clinpsy-050718-095617

Paulus, M. P., & Stein, M. B. (2006). An Insular View of Anxiety. *Biological Psychiatry*, *60*(4), 383–387. https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2006.03.042

Peacocke, C. (2023). Mental Action and Self-Awareness (I). In *Contemporary Debates in Philosophy of Mind* (pp. 341–358). John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1002/9781394259847.ch20

Pivac, N., Vuic, B., Sagud, M., Nedic Erjavec, G., Nikolac Perkovic, M., Konjevod, M., Tudor, L., Svob Strac, D., Uzun, S., Kozumplik, O., Uzun, S., &

Mimica, N. (2023). PTSD, Immune System, and Inflammation. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, *1411*, 225–262. https://doi.org/10.1007/978-981-19-7376-5_11

Prajapati, S. K., Majumdar, S., Murari, S., MachhindraVadak, K., & Krishnamurthy, S. (2025). Neurochemical, Neurocircuitry, and Psychopathological Mechanisms of PTSD: Emerging Pharmacotherapies and Clinical Perspectives. *ACS Chemical Neuroscience*, *16*(13), 2355–2370. https://doi.org/10.1021/acschemneuro.5c00335

Probst, M. (2010). Psychomotor Therapy and Psychiatry: What's in a Name? *The Open Complementary Medicine Journal*, *2*(1), 105–113. https://doi.org/10.2174/1876391X010020010105

Rabellino, D., Burin, D., Harricharan, S., Lloyd, C., Frewen, P. A., McKinnon, M. C., & Lanius, R. A. (2018). Altered Sense of Body Ownership and Agency in Posttraumatic Stress Disorder and Its Dissociative Subtype: A Rubber Hand Illusion Study. *Frontiers in Human Neuroscience*, *12*, 163. https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00163

Resick, P. A., & Schnicke, M. K. (1992). Cognitive processing therapy for sexual assault victims. *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, *60*(5), 748–756. https://doi.org/10.1037//0022-006x.60.5.748

Riemer, M., Trojan, J., Beauchamp, M., & Fuchs, X. (2019). The rubber hand universe: On the impact of methodological differences in the rubber hand illusion. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *104*, 268–280. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2019.07.008

Röhricht, F. (2009). Body oriented psychotherapy. The state of the art in empirical research and evidence-based practice: A clinical perspective. *Body, Movement and Dance in Psychotherapy*, *4*(2), 135–156.

Ross, M. C., & Cisler, J. M. (2020). Altered large-scale functional brain organization in posttraumatic stress disorder: A comprehensive review of univariate and network-level neurocircuitry models of PTSD. *NeuroImage: Clinical*, *27*, 102319. https://doi.org/10.1016/j.nicl.2020.102319

Rossetti, I., Musco, M. A., Sacheli, L. M., Capuzzi, E., Clerici, M., Caldiroli, A., Demartini, B., Broglia, G., Nisticò, V., Florio, V., Conca, A., Maravita, A., Paulesu, E., & Zapparoli, L. (2025). Dissecting Sense of Agency in Schizophrenia: A Predictive Coding Perspective. *Schizophrenia Bulletin*, sbaf054. https://doi.org/10.1093/schbul/sbaf054

Rossetti, I., Repossi, M., Florio, V., Demartini, B., Conca, A., Gambini, O., & Maravita, A. (2022). Sense of body ownership and body agency in schizophrenia. *Scientific Reports*, *12*(1), 19369. https://doi.org/10.1038/s41598-022-23988-y

Rothärmel, M., Benosman, C., El-Hage, W., Berjamin, C., Ribayrol, D., Guillin, O., Gaillard, R., Berkovitch, L., & Moulier, V. (2022). Efficacy and Safety of Intranasal Esketamine in Patients With Treatment-Resistant Depression and Comorbid Chronic Post-traumatic Stress Disorder: Open-Label Single-Arm Pilot Study. *Frontiers in Psychiatry*, *13*, 865466. https://doi.org/10.3389/fpsyt.2022.865466

Routledge, F. S., Campbell, T. S., McFetridge-Durdle, J. A., & Bacon, S. L. (2010). Improvements in heart rate variability with exercise therapy. *Canadian Journal of Cardiology*, *26*(6), 303–312. https://doi.org/10.1016/S0828-282X(10)70395-0

Rowe, J. B., Hughes, L., & Nimmo-Smith, I. (2010). Action selection: A race model for selected and non-selected actions distinguishes the contribution of premotor and prefrontal areas. *NeuroImage*, *51*(2), 888–896. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.02.045

Royal College of Psychiatrists. (2023). *Post-traumatic stress disorder (PTSD) | Royal College of Psychiatrists*. Www.Rcpsych.Ac.Uk. https://www.rcpsych.ac.uk/mental-health/problems-disorders/post-traumatic-stress-disorder

Ruiz, C., & Kurkdjian, L. (2007). La santé mentale en population générale : images et réalités. Premiers résultats en région PACA. *L'information psychiatrique*, *83*(10), 821–826. https://doi.org/10.1684/ipe.2007.0261

Sareen, J. (2014). Posttraumatic Stress Disorder in Adults: Impact, Comorbidity, Risk Factors, and Treatment. *Canadian Journal of Psychiatry. Revue Canadienne de Psychiatrie*, *59*(9), 460–467.

Schimmelpfennig, J., Topczewski, J., Zajkowski, W., & Jankowiak-Siuda, K. (2023). The role of the salience network in cognitive and affective deficits. *Frontiers in Human Neuroscience*, *17*. https://doi.org/10.3389/fnhum.2023.1133367

Schneider, K. (1959). *Clinical psychopathology.(Trans. By MW Hamilton)*.

Seligowski, A. V., Lee, D. J., Bardeen, J. R., & Orcutt, H. K. (2015). Emotion Regulation and Posttraumatic Stress Symptoms: A Meta-Analysis. *Cognitive Behaviour Therapy*, *44*(2), 87–102. https://doi.org/10.1080/16506073.2014.980753

Shalev, A., Liberzon, I., & Marmar, C. (2017). Post-Traumatic Stress Disorder. *The New England Journal of Medicine*, *376*(25), 2459–2469. https://doi.org/10.1056/NEJMra1612499

Sierra, M., & Berrios, G. E. (1998). Depersonalization: Neurobiological perspectives. *Biological Psychiatry*, *44*(9), 898–908. https://doi.org/10.1016/s0006-3223(98)00015-8

Sierra, M., & David, A. S. (2011). Depersonalization: A selective impairment of self-awareness. *Consciousness and Cognition*, *20*(1), 99–108. https://doi.org/10.1016/j.concog.2010.10.018

Soares-Weiser, K., Maayan, N., Bergman, H., Davenport, C., Kirkham, A. J., Grabowski, S., & Adams, C. E. (2015). First rank symptoms for schizophrenia. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, *1*. https://doi.org/10.1002/14651858

Spence, S. A., Brooks, D. J., Hirsch, S. R., Liddle, P. F., Meehan, J., & Grasby, P. M. (1997). A PET study of voluntary movement in schizophrenic patients experiencing passivity phenomena (delusions of alien control). *Brain: A Journal of Neurology*, *120 (Pt 11)*, 1997–2011. https://doi.org/10.1093/brain/120.11.1997

Sperduti, M., Delaveau, P., Fossati, P., & Nadel, J. (2011). Different brain structures related to self- and external-agency attribution: A brief review and meta-analysis. *Brain Structure & Function*, *216*(2), 151–157. https://doi.org/10.1007/s00429-010-0298-1

Stephan, K. E., & Mathys, C. (2014). Computational approaches to psychiatry. *Current Opinion in Neurobiology*, *25*, 85–92. https://doi.org/10.1016/j.conb.2013.12.007

Synofzik, M., Vosgerau, G., & Newen, A. (2008). Beyond the comparator model: A multifactorial two-step account of agency. *Consciousness and Cognition*, *17*(1), 219–239. https://doi.org/10.1016/j.concog.2007.03.010

Thayer, J. F., & Lane, R. D. (2009). Claude Bernard and the heart–brain connection: Further elaboration of a model of neurovisceral integration. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *33*(2), 81–88. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2008.08.004

Tisserand, A., Philippi, N., Botzung, A., & Blanc, F. (2023). Me, Myself and My Insula: An Oasis in the Forefront of Self-Consciousness. *Biology*, *12*(4), Article 4. https://doi.org/10.3390/biology12040599

Tsakiris, M. (2010). My body in the brain: A neurocognitive model of body-ownership. *Neuropsychologia*, *48*(3), 703–712. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.09.034

Tsakiris, M., Carpenter, L., James, D., & Fotopoulou, A. (2010). Hands only illusion: Multisensory integration elicits sense of ownership for body parts but not for non-corporeal objects. *Experimental Brain Research*, *204*, 343–352.

Tsakiris, M., Costantini, M., & Haggard, P. (2008). The role of the right temporo-parietal junction in maintaining a coherent sense of one's body. *Neuropsychologia*, *46*(12), 3014–3018. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2008.06.004

Tsakiris, M., Jiménez, A. T.-, & Costantini, M. (2011). Just a heartbeat away from one's body: Interoceptive sensitivity predicts malleability of body-representations. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *278*(1717), 2470–2476. https://doi.org/10.1098/rspb.2010.2547

Tsakiris, M., Schütz-Bosbach, S., & Gallagher, S. (2007). On agency and body-ownership: Phenomenological and neurocognitive reflections. *Consciousness and Cognition*, *16*(3), 645–660. https://doi.org/10.1016/j.concog.2007.05.012

Uno, Y., & Coyle, J. T. (2019). Glutamate hypothesis in schizophrenia. *Psychiatry and Clinical Neurosciences*, *73*(5), 204–215. https://doi.org/10.1111/pcn.12823

Ursano, R. J., Fullerton, C. S., Weisaeth, L., & Raphael, B. (2017). *Textbook of disaster psychiatry*. Cambridge University Press.

Van de Kamp, M. M., Scheffers, M., Hatzmann, J., Emck, C., Cuijpers, P., & Beek, P. J. (2019). Body-and movement-oriented interventions for posttraumatic stress disorder: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Traumatic Stress*, *32*(6), 967–976. https://doi.org/10.1002/jts.22465

Van der Kolk, B. (2014). The body keeps the score: Brain, mind, and body in the healing of trauma. *New York*.

Virtanen, N., Tiippana, K., Tervaniemi, M., Poikonen, H., Anttila, E., & Kaseva, K. (2022). Exploring body consciousness of dancers, athletes, and lightly physically active adults. *Scientific Reports*, *12*(1), Article 1. https://doi.org/10.1038/s41598-022-11737-0

Vogt, D. S., King, D. W., & King, L. A. (2007). Risk pathways for PTSD. *Handbook of PTSD: Science and Practice*, 99–115.

Waters, F. A. V., & Badcock, J. C. (2010). First-rank symptoms in schizophrenia: Reexamining mechanisms of self-recognition. *Schizophrenia Bulletin*, *36*(3), 510–517. https://doi.org/10.1093/schbul/sbn112

Wehrman, J. J., Casey, C., Tanabe, S., Mohanta, S., Filbey, W., Weber, L., Banks, M. I., Pearce, R. A., Saalmann, Y., & Sanders, R. D. (2023). Subanaesthetic doses of ketamine reduce but do not eliminate predictive coding responses: Implications for mechanisms of sensory disconnection. *British Journal of Anaesthesia*, *131*(4), 705–714. https://doi.org/10.1016/j.bja.2023.06.044

Yamada, Y., & Sumiyoshi, T. (2021). Neurobiological Mechanisms of Transcranial Direct Current Stimulation for Psychiatric Disorders; Neurophysiological, Chemical, and Anatomical Considerations. *Frontiers in Human Neuroscience*, *15*. https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.631838

Yehuda, R., Hoge, C. W., McFarlane, A. C., Vermetten, E., Lanius, R. A., Nievergelt, C. M., Hobfoll, S. E., Koenen, K. C., Neylan, T. C., & Hyman, S. E. (2015). Post-traumatic stress disorder. *Nature Reviews. Disease Primers*, *1*, 15057. https://doi.org/10.1038/nrdp.2015.57

Zeller, D., Friston, K. J., & Classen, J. (2016). Dynamic causal modeling of touch-evoked potentials in the rubber hand illusion. *NeuroImage*, *138*, 266–273. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.05.065

Zheng, S., Song, N., Wang, S., Ning, Y., Zhu, H., Song, M., Jia, Y., & Jia, H. (2022). Potential Targets for Noninvasive Brain Stimulation on Depersonalization-Derealization Disorder. *Brain Sciences*, *12*(8), 1112. https://doi.org/10.3390/brainsci12081112

Zito, G. A., Wiest, R., & Aybek, S. (2020). Neural correlates of sense of agency in motor control: A neuroimaging meta-analysis. *PLOS ONE*, *15*(6), e0234321. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0234321

PARTIE 3 :

APPROCHE EXPÉRIMENTALE

Des anomalies spécifiques du sens de propriété du corps et de l'agentivité dans le trouble de stress post-traumatique selon le sous-type dissociatif qui sont modifiés par la stimulation transcrânienne à courant continu

---

Specific abnormalities of the sense of body ownership and agency in post-traumatic stress disorder according to the dissociative subtype modified by transcranial direct current stimulation

---

Andrew Laurin [a], Samuel Bulteau [b], Aléna Harscoet [c], Thibault Deschamps [d] & Anne Sauvaget [a]

a. Nantes Université, CHU Nantes, Movement - Interactions - Performance, MIP, UR 4334, F-44000 Nantes, France
b. Nantes Université, CHU Nantes, INSERM, MethodS in Patients-centered outcomes and HEalth Research, SPHERE F-44000 Nantes, France
c. Nantes Université, F-44000 Nantes, France
d. Nantes Université, Movement - Interactions - Performance, MIP, UR 4334, F-44000 Nantes, France

Mots clés : Trouble de stress post-traumatique ; Dissociation ; Agentivité ; Propriété du corps ; Stimulation transcrânienne à courant continu ; Illusion de la main en caoutchouc

---

RÉSUMÉ

Introduction : Le trouble de stress post-traumatique (TSPT) repose sur une altération des processus prédictifs dont dépendent le sens de propriété du corps (SBO) et d'agentivité (SoA) qui sont évaluables par l'illusion de la main en caoutchouc dynamique (RHI). Cependant, le sous-type dissociatif (TSPT-DS) présente des altérations neurobiologiques spécifiques. Le cortex préfrontal dorsolatéral gauche (CPFdl) est une cible thérapeutique de la stimulation électrique transcrânienne à courant continu (tDCS) également impliquée dans le SBO et le SoA.
Matériel et méthode : Nous avons réalisé la RHI chez 12 sujets sains, 8 patients TSPT et 8 patients TSPT-DS. Dans un second temps nous avons réalisé la RHI associée à une stimulation anodale par tDCS *on-line* du CPFdl gauche.
Résultats : Le groupe TSPT se caractérise par un SoA élevé et une discrimination soi-autrui légèrement affectée par un biais temporel. Le groupe TSPT-DS présente un biais proprioceptif élevé, un SoA dépendant du SBO et une discrimination soi-autrui fortement dépendante de l'atténuation sensorielle des mouvements volontaires. La

tDCS *on-line* améliore le SoA dans les trois groupes mais ne module le SBO que chez les sujets sains.
Conclusion : Les atteintes spécifiques de la conscience du corps entre le TSPT et le TSPT-DS imposent des soins personnalisés.

---

1. Introduction

Historiquement, les théories explicatives du trouble de stress post-traumatique (TSPT) reposaient sur trois axes principaux : le déficit de régulation émotionnelle (Lokshina et al., 2023; Tull et al., 2020), les modèles cognitifs (Nijdam & Wittmann, 2022) et le conditionnement (Bienvenu et al., 2021; Ney et al., 2022). Récemment, la psychiatrie computationnelle a proposé une reconceptualisation du TSPT via la théorie prédictive et l'inférence bayésienne (Kube et al., 2020). Selon cette théorie, le cerveau élabore des modèles internes à partir des expériences passées pour prédire et interpréter les nouvelles informations sensorielles ; une erreur de prédiction suffisamment fiable et précise imposera une mise à jour des croyances pour ajuster les prédictions ultérieures (Barrett & Simmons, 2015; Kanai et al., 2015; Köster et al., 2020; Montague et al., 2012; Paulus et al., 2019; Stephan & Mathys, 2014). En sens inverse, les croyances modulent les entrées sensorielles. En effet, selon la théorie de l'inférence bayésienne, la prédiction probabiliste préalable (« *prior* ») est combinée à la probabilité de la nouvelle information sensorielle (« *likelihood* ») pour former une perception *a posteriori* (« *prior* » x « *likelihood* ») (Knill & Pouget, 2004).

Dans le TSPT, l'événement traumatique est encodé comme une croyance négative hyperprécise (Kube & Rozenkrantz, 2021) difficile à mettre à jour en raison de la faible précision des expériences de la vie quotidienne. Ainsi, les perceptions et croyances liées au trauma persistent et sont réactivées lors des reviviscences. Dès lors, le TSPT est considéré comme un trouble mental sous-tendu par une défaillance du système prédictif (Kube et al., 2020), ce qui implique de potentielles répercussions sur les fonctions cognitives dépendantes du système de prédiction, à savoir des deux composantes principales de la conscience du corps que sont le sens d'agentivité (*Sense of Agency*, SoA) et le sens de propriété du corps (*Sense of Body Ownership*, SBO).

Le SoA correspond à l'expérience subjective d'être l'auteur d'une action volontaire et d'en mesurer l'impact sur son environnement (Braun et al., 2018; Haggard, 2017; Haggard et al., 2002; Moore, 2016). Le SoA est fondé sur la concordance entre les prédictions motrices (copies d'efférence) et les retours sensoriels (Ford & Mathalon, 2019; Frith, 2012; Frith et al., 2000). Le sens de propriété du corps quant à lui renvoie à la perception que notre corps nous appartient, c'est un élément central de la distinction soi-autrui (Ehrsson, 2020; Gallagher, 2000). Le SBO repose sur l'intégration multisensorielle probabiliste (Chancel et al., 2022; Körding et al., 2007; Samad et al., 2015). Ces deux processus sont donc dépendants des mécanismes prédictifs. Dans le TSPT, nous faisons une première hypothèse à savoir que l'hyper-

précision des croyances traumatiques les rendent peu sensibles aux mises à jour perceptuelles rigidifiant les représentations mentales de soi, ayant pour conséquence un SBO peu malléable.

L'illusion de la main en caoutchouc (*Rubber Hand Illusion*, RHI) est la tâche expérimentale de référence pour évaluer le SBO (Botvinick & Cohen, 1998). Dans la RHI, une stimulation visuo-tactile synchrone engendre une erreur de prédiction qui est résolue par une mise à jour qui incorpore la main factice dans la représentation mentale du corps, d'où l'illusion perçue. Or, les patients avec TSPT montrent une difficulté à générer cette illusion (Rabellino et al., 2018), ce qui peut s'expliquer par des difficultés de mise à jour perceptuelle. Cependant, il existe un sous-type dissociatif du TSPT (TSPT-DS) qui est caractérisé par d'importants symptômes de dépersonnalisation et déréalisation (APA, 2013). Ces symptômes sont la conséquence d'un syndrome de déconnexion limbique qui provoque une anesthésie émotionnelle et une perturbation des voies d'intégration sensorielle (Nicholson, Harricharan, et al., 2020; Nicholson, McKinnon, et al., 2020). Au vu de ces éléments, nous complétons notre hypothèse principale en estimant que le SBO sera affecté de manière différente dans le TSPT-DS avec des représentations mentales instables et malléables, ce qui va dans le sens d'une illusion forte à la RHI retrouvée chez les patients avec un TSPT-DS (Rabellino et al., 2018). Cependant, dans sa version initiale, la RHI ne permet pas d'évaluer le SoA qui peut être influencé par le SBO.

Dans la version dynamique de la RHI (Kalckert & Ehrsson, 2012), l'illusion est induite par des mouvements volontaires actifs de l'index permettant d'évaluer simultanément le SBO et le SoA. Ce paradigme expérimental a mis en évidence que le SBO et le SoA sont à la fois en interaction et dissociable. En effet, l'introduction d'un biais temporel lors du mouvement volontaire (asynchrone) abolit le SBO permettant d'isoler le SoA, alors qu'un mouvement passif synchrone abolit le SoA permettant d'isoler le SBO. À notre connaissance, la RHI dynamique n'a jamais été utilisée pour étudier le SBO et le SoA dans le TSPT, encore moins selon le sous-type dissociatif. Pour compléter notre hypothèse principale, nous pensons que le SBO, et par extension le SoA, seront affectés de manière différente selon la nature dissociative du TSPT et évaluable par la RHI dynamique. À noter que les études portant sur la conscience corporelle doivent prendre en compte des variables d'influence comme l'âge et le sexe (Longo et al., 2008), les traitements psychotropes (Peled et al., 2000, 2003), l'état psychologique des participants (Riemer et al., 2019) et notamment la dépression (Parrick, 2013), les antécédents de traumatismes (Kealy et al., 2017) et les traumas précoces (Briere & Rickards, 2007; Paetzold & Rholes, 2021).

La stimulation électrique transcrânienne à courant continu (tDCS) fait l'objet d'une attention et de recherches croissantes en médecine (Kuo et al., 2014; Manocchio et al., 2025; Wang et al., 2024; Zheng et al., 2024). La tDCS est une technique de neuromodulation non-invasive permettant de moduler l'excitabilité cérébrale des zones cibles en utilisant un courant de faible intensité diffusé au niveau du scalp au moyen d'une anode (excitatrice) et d'une cathode (inhibitrice) (Yamada & Sumiyoshi, 2021). Dans les études sur le TSPT, la tDCS est souvent utilisée pour

stimuler les régions préfrontales qui sont impliquées dans la régulation des émotions et la modulation de la peur conditionnée (Liu et al., 2024; Van't Wout et al., 2017; Xie et al., 2024; Yang et al., 2025). Ces régions préfrontales sont également impliquées dans les processus du SoA (préparation et sélection motrice) (Rowe et al., 2010) et du SBO (modulation de l'intégration sensorielle, régulation attentionnelle et émotionnelle) (Ehrsson, 2020), nous poussant à faire l'hypothèse secondaire que la tDCS appliquée en regard du cortex préfrontal dorsolatéral gauche affecterait également ces processus cognitifs.

Ainsi, l'objectif principal de notre étude est d'étudier le SBO et le SoA au moyen de la RHI dynamique chez des patients souffrant d'un TSPT versus TSPT-DS en comparaison à des sujets sains. L'objectif secondaire était d'étudier les effets de la stimulation anodale du cortex préfrontal dorsolatéral gauche par tDCS sur les performances de la RHI dynamique.

2. Matériel et méthode

2.1. Participants

Les participants ayant comme diagnostic principal un TSPT ont été identifiés en consultations ambulatoires par leur psychiatre référent. Ces derniers ont transmis aux participants intéressés les coordonnées de l'investigateur. Les psychiatres avaient été préalablement informés de l'étude par courrier et par mails. Les sujets sains ont été recrutés parmi les étudiants et professionnels de Nantes Université grâce à la diffusion de mails contenant des informations sur l'étude avec les coordonnées de l'investigateur.

Nous avons appliqué les critères d'inclusion suivants : hommes et femmes âgés de 18 à 65 ans ; souffrant d'un TSPT (sauf pour les sujets sains) confirmé par un score total à la *PTSD Checklist for DSM-5* (PCL-5) ≥ 33 (Bovin et al., 2016; Dickstein et al., 2014; Krüger-Gottschalk et al., 2017; Rosendahl et al., 2019) ; TSPT en lien à une exposition traumatique directe (sauf pour les sujets sains) ; latéralisation manuelle droitière ou ambidextre confirmée par un score total ≥ −40 au test de latéralisation d'Edinburgh (*Edinburgh Handedness Inventory*) (Oldfield, 1971) ; être capable de parler et lire le français ; être naïfs de la RHI.

Nous avons appliqué les critères de non-inclusion suivants : latéralisation manuelle gauchère avec un score total < −40 au test d'Edinburgh (Oldfield, 1971) ; mauvaise compréhension du français ; trouble sévère de l'usage de substance lors des 6 derniers mois (hors caféine et tabac) ; traitement par stimulation électrique transcrânienne à courant direct (tDCS) durant le TSPT en cours ; malvoyant sévère ; contre-indication à la tDCS ; pathologie du système nerveux central ou périphérique ; femme enceinte ; trouble délirant ; trouble schizophrénique ; trouble bipolaire ; dépression sévère selon l'investigateur principal ; toute circonstance rendant le sujet incapable de comprendre la nature, les objectifs ou les conséquences de l'étude ; soins sous contrainte ; patient sous mesure de protection juridique (curatelle ou tutelle) ; absence de couverture sociale.

Les participants étaient considérés comme sains uniquement si toutes les conditions suivantes étaient réunies : pas de traitement pharmacologique ou psycho-thérapeutique en cours ; pas de consommation régulière de substance psychoactive hormis le tabac et la caféine ; pas de trouble dissociatif confirmé par un score total ≤ 25% à la version française de la *Dissociative Experience Scale Revised* (DES-2) (Draijer & Boon, 1993); pas d'abus ou de négligence grave durant l'enfance à la version française du *Childhood Trauma Questionnaire* (CTQ) (Paquette et al., 2004); absence d'épisode dépressif confirmé par un score total ≤ 3 à la version française de la *Beck Depression Inventory 13 items* (BDI-13) (Bourque & Beaudette, 1982) ; pas d'antécédent de psychotraumatisme majeur ; pas de TSPT passé ou présent ; être répondeur à la RHI.

Nous avons inclus 40 participants mais 11 sujets sains ont été exclus car ils étaient non répondeurs à la RHI et 1 participant du groupe TSPT-DS a été exclu après la découverte d'un trouble du spectre de l'autisme. Finalement, 28 participants ont été retenus dans les analyses formant un échantillon composé de 12 sujets sains, 8 patients avec un TSPT et 8 patients avec un TSPT-DS.

2.2. Données recueillies

Pour chaque participant, nous avons recueilli les données sociodémographiques incluant l'âge, le sexe, les traitements psychotropes ; les données cliniques et psychométriques ; les données de la RHI réalisée sans puis avec la tDCS *on-line*.

2.3. Procédure

2.3.1. Type d'étude

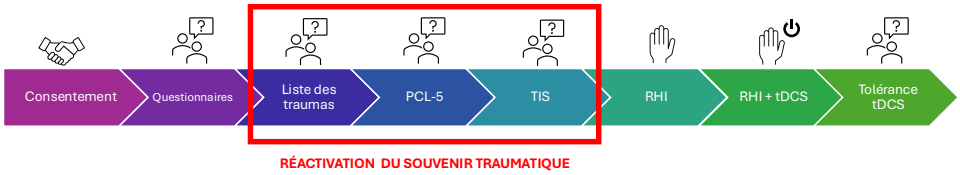
Au premier contact téléphonique, l'investigateur qui était un médecin psychiatre doctorant en neurosciences (AL), et après s'être assuré des critères d'inclusion et de non-inclusion lors d'une pré-sélection, proposait une visite d'inclusion et d'évaluation. Lors de cette visite, l'investigateur exposait à tout participant éligible les objectifs de l'étude, les avantages attendus, et les risques possibles. Les informations étaient transmises par oral et par écrit. Il s'agissait d'une étude anonyme et confidentielle sans recueil de donnée nominative directe ou indirecte. Après vérification des critères d'inclusion et de non-inclusion, et après l'obtention du consentement écrit, l'ensemble des participants ont réalisé tous les tests en une seule séance dont la durée totale était d'environ 2h30 par participant (sauf en cas d'exclusion pour les non-répondeur à la RHI). Il est important de noter que les évaluations suivaient un ordre précis qui a toujours été le même pour tous les participants (Figure 1) :

- Les questions socio-démographiques, le recueil des traitements psychotropes, puis les échelles cliniques en finissant toujours, dans cet ordre, par la liste des évènements traumatiques, puis la version française de la PCL-5 (Rivest-Beauregard et al., 2022) et pour finir la

version française de la *Tonic Immobility Scale* (TIS) (Laurin et al., 2024) : ces échelles faisaient offices de tâches de réactivation traumatique ;

- Passation de la RHI sans tDCS ;
- Passation de la RHI associée à la tDCS *on-line*.

Figure 1 : Flow-chart



Abréviations : ET : Évènements traumatiques, PCL-5 : PTSD Checklist for DSM-5, TIS : Tonic Immobility Scale, RHI : Rubber Hand Illusion, tDCS : transcranial Direct Current Stimulation.

2.3.3. Échelles cliniques

Toutes les évaluations cliniques ont été réalisées en présence d'un médecin psychiatre doctorant en neurosciences (AL) formé à la passation des échelles cliniques, à l'illusion de main en caoutchouc dynamique et à l'utilisation de la tDCS. Les évaluations incluaient :

- Un test de latéralisation manuelle d'Edinburgh pour confirmer la latéralisation droitière ou ambidextre des participants (Oldfield, 1971) ;
- Une liste d'évènements traumatiques indiquant l'évènement traumatique index (évènement considéré comme la cause des symptômes post-traumatiques actuels) et son ancienneté (en mois) ;
- La *PTSD Checklist for DSM-5* (PCL-5) (Weathers et al., 1993; Weathers, Litz, et al., 2013) validée en français (Ashbaugh et al., 2016) évaluant les symptômes du TSPT au cours du mois écoulé tout en précisant l'ancienneté des symptômes (en mois) ;
- La *Clinician Administred PTSD Scale* (CAPS-5) (Blake et al., 1990; Weathers, Blake, et al., 2013) validée en français (Rivest-Beauregard et al., 2022) qui contient deux items qui font directement référence aux expériences dissociatives, à savoir les items 29 (dépersonnalisation) et 30 (déréalisation) : les participants pour lesquels la somme des scores « *Intensité* » + « *Fréquence* » était ≥ 4 à au moins l'un de des deux items était inclus dans le bras TSPT-dissociatif telle que le recommande des études précédentes sur le sujet (Rabellino et al., 2016, 2018; Weathers et al., 1999) ;
- La *Dissociative Experience Scale - Revised* (DES-2) (Carlson & Putnam, 1993) traduite en français (Darves-Bornoz et al., 1999) évaluant la fréquence des symptômes dissociatifs chez les adultes de plus de 18 ans ;
- Le *Childhood Trauma Questionnaire* (CTQ) (Bernstein et al., 1994 ; Bernstein, Ahluvalia, Pogge, & Handelsman, 1997) validé en français (Paquette et al., 2004) qui permet d'étudier les différentes formes d'abus et négligences vécues durant l'enfance ;

- La *Beck Depression Inventory-13 items* (BDI-13) (Beck & Beamesderfer, 1974) traduite en français (Bourque & Beaudette, 1982) évaluant les symptômes dépressifs au cours de la semaine écoulée ;
- La *Tonic Immobility Scale - Adult Form* (TIS) (Forsyth et al., 2000) validée en français (Laurin et al., 2024) qui contient 4 items évaluant l'intensité de l'immobilité tonique survenue au moment du traumatisme index.

2.3.4. L'illusion de la main en caoutchouc dynamique

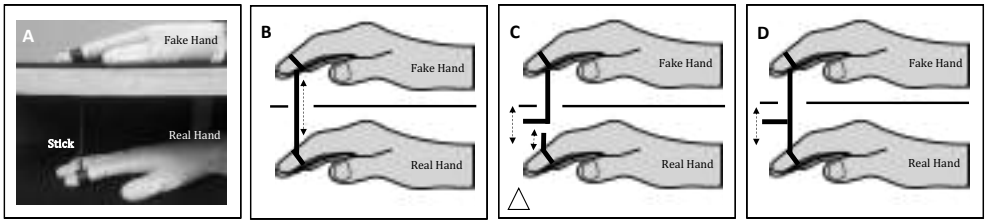
Les participants ont réalisé l'illusion de la main en caoutchouc dynamique (*The Moving Rubber Hand Illusion*, RHI) (Figure 2) conformément aux descriptions de Kalckert et Ehrsson (2012, 2014). La RHI se réalise sur la main dominante et nous n'avions que des modèles de main droitière ce qui explique pourquoi seulement les droitiers et ambidextres ont été inclus dans l'étude. Les participants, tous naïfs de la RHI, étaient assis devant une table sur laquelle se trouvait à 50 cm devant eux une boîte en bois aux dimensions de 35 × 25 × 15 cm. Les participants ont placé leur main droite préalablement placée dans un gant en caoutchouc à l'intérieur de la boîte, la face palmaire vers le bas. Ainsi seule la fausse main était visible au-dessus de la boîte avec une vue naturelle à la première personne. La main réelle et la main factice étaient reliées par une tige rigide au niveau de l'articulation interphalangienne distale de l'index. Sur la face gauche de la boîte était fixé une fine planche de bois recouvert d'un papier millimétré dont le niveau 0 indiquait le plancher de la boite. Un drap noir était tendu entre l'épaule droite du participant et la boîte pour donner une illusion de continuité entre le participant et la boîte. L'expérimentateur était placé devant les participants avec un drap noir tendu entre son épaule et la boîte afin de cacher les manipulations. L'expérimentateur était présent tout au long de l'expérience.

Figure 2 : L'illusion de la main en caoutchouc dynamique avec la tige (A) qui relie l'index de la main factice au-dessus de la boite (B) à l'index de la vraie main qui est dans la boite (C). L'image de droite représente un pointage indiquant la hauteur à laquelle le participant ressent sa vraie main, une mesure nécessaire pour calculer le biais proprioceptif.

Nous avons réalisé trois conditions de 60 secondes chacune, toutes en situation de congruence anatomique, c'est-à-dire sans rotation ou angulation de la fausse main par rapport à la position de la vraie. Les trois conditions étaient dans l'ordre de réalisation (Figure 3) : (i) active synchrone (AS) dans laquelle les index de la vraie et de la fausse main étaient connectés pour réaliser des mouvements volontaires

d'extension de l'index à une fréquence d'environ 1Hz, (ii) passive synchrone (PS) dans laquelle les index de la vraie et de la fausse main restaient connectés mais sans mouvement volontaire car les mouvements synchrones des deux index étaient assurés par l'expérimentateur à une fréquence d'environ 1Hz, (iii) active asynchrone dans laquelle l'index de la vraie main et de la main factice ont été déconnectés permettant à l'expérimentateur d'étendre l'index de la fausse main avec un retard d'environ 500 ms par rapport aux mouvements volontaires de la vraie main. Nous avons choisi ces trois conditions pour évaluer l'impact d'un biais temporel et d'un défaut de copie d'efférence sur le SBO et le SoA. Immédiatement avant et après chacune des conditions, grâce à leur index gauche, chaque participant pointait sur la feuille de papier millimétrée la hauteur à laquelle il ressentait leur main. La différence de hauteurs entre les deux mesures correspond au biais proprioceptif, exprimé en centimètres, qui correspond à une mesure sensorielle objective du SBO (« *likelihood* »).

Figure 3 : Illustration de (A) l'illusion de la main en caoutchouc dynamique et des 3 conditions réalisées dans notre étude à savoir la condition (B) active synchrone, (C) active asynchrone, (D) passive synchrone. Le triangle indique la présence d'un biais temporel défini par un décalage entre le mouvement des deux index. Extrait et adapté de Laurin et al. 2021



Après chaque condition, les participants ont rempli le questionnaire de 16 items construit par Kalckert et Ehrsson qui évalue de manière subjective le SBO et le SoA (Kalckert & Ehrsson, 2012 ; Longo et al., 2008) (Tableau 1). Concernant le SBO, les mesures du questionnaire sont des mesures perceptuelles (« *likelihood* » x « *prior* ») différentes mais complémentaires du biais proprioceptif qui est une mesure principalement sensorielle (« *likelihood* ») (Gallagher et al., 2021). Les énoncés ont été classés de manière aléatoire afin d'explorer l'expérience subjective du SBO et du SoA sur une échelle de Lickert à 7 points allant de « –3 » (pas du tout d'accord) à « +3 » (tout à fait d'accord) en passant par le « 0 » (ni d'accord ni désaccord). Après chacune des conditions, nous avons calculé les scores moyens obtenus pour chacune des expériences de SBO et SoA avant de définir la valeur médiane des différentes moyennes obtenues dans chaque groupe. Une valeur médiane $\geq +1$ confirme que les participants d'un groupe ont bien eu une expérience subjective de SBO ou SoA. Une valeur médiane compris entre -1 et +1 (ni d'accord ni désaccord) signifie une expérience neutre. Enfin, une valeur médiane < -1 confirme que les participants d'un groupe n'ont pas perçu l'expérience subjective de SBO ou SoA. Le questionnaire comprenait également 8 items de contrôle (4 items pour le SoA contrôle et 4 items pour le SBO contrôle). Les items de contrôle servent généralement à vérifier la conformité de la tâche et la suggestibilité des participants. Dans notre étude, nous nous sommes intéressés aux items contrôles car certains items permettent d'évaluer la capacité de discrimination soi-autrui. En effet, alors que le SoA évalue le

sentiment de contrôler les mouvements de la main en caoutchouc, le SoA contrôle permet d'évaluer dans quelle mesure les patients avaient l'impression que c'était la main en caoutchouc qui contrôlait leurs volontés ou leurs mouvements. De la même manière, alors que le SBO évalue le sentiment que la fausse main devient celle du patient avec l'impression que la vraie main se décale vers la main en caoutchouc, le SBO contrôle permet d'évaluer dans quelle mesure c'est la vraie main qui devient comme en caoutchouc avec un sentiment que c'est la main en caoutchouc qui se déplace vers la vraie main. Une analyse par item a été réalisé en cas de mesures anormales de la RHI dans les items contrôle pour essayer de mieux comprendre les résultats.

Tableau 1 : Questionnaire en 16 items de l'illusion de main en caoutchouc dynamique (extrait et traduit de Kalckert & Ehrsson, 2012)

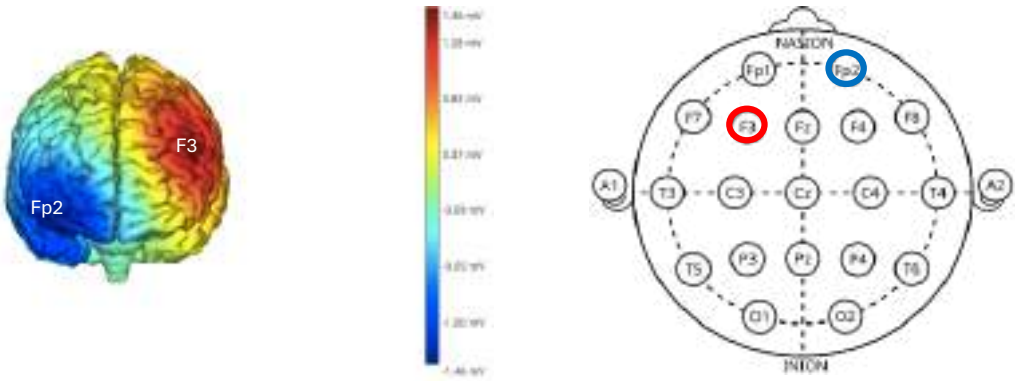
Propriété du corps propre 1. Je sentais comme si je regardais ma propre main 2. Je sentais comme si la main en caoutchouc faisait partie de mon corps 3. C'était comme si je ressentais le mouvement de mon doigt à l'endroit où le doigt en caoutchouc bougeait 4. Je sentais comme si la main en caoutchouc était ma main	**Propriété du corps propre (contrôle)** 5. Je sentais comme si ma vraie main devenait comme en caoutchouc 6. C'était comme si j'avais plus qu'une main droite 7. C'était comme si la main en caoutchouc se décalait vers ma vraie main 8. Je sentais comme si je n'avais plus de main droite, comme si ma main droite avait disparu
Agentivité 9. La main en caoutchouc bougeait exactement comme je le voulais, comme si elle obéissait à ma volonté 10. Je sentais comme si je contrôlais les mouvements de la main en caoutchouc 11. Je sentais comme si j'étais à l'origine du mouvement que je voyais 12. Chaque fois que je bougeais mon doigt, je m'attendais à ce que le doigt en caoutchouc bouge de la même façon	**Agentivité (contrôle)** 13. Je sentais comme si la main en caoutchouc contrôlait ma volonté 14. Je sentais comme si la main en caoutchouc contrôlait mes mouvements 15. Je pouvais sentir le mouvement quelque part entre ma vraie main et la main en caoutchouc 16. C'était comme si la main en caoutchouc avait sa propre volonté

De manière physiologique, toutes les personnes ne sont pas répondeuses à la RHI. Un répondeur est classiquement défini comme tout participant ayant une perception d'illusion à la RHI en condition active synchrone. D'un point de vue méthodologique, la présence des non-répondeurs soulève la question de les exclure (Riemer et al., 2019). Dans notre étude, les sujets sains qui étaient non-répondeurs à la RHI ont été exclus. Le critère de réponse est historiquement centré sur l'évaluation subjective et néglige le biais proprioceptif qui a été longtemps considéré comme une mesure équivalente et corrélée à la force de la RHI. Cependant, des travaux récents ont démontré que la RHI et le biais proprioceptif étaient basés sur deux processus cognitifs différents, le premier étant une mesure principalement perceptive et le second étant une mesure principalement sensorielle : ils sont en interaction mais dissociables (Gallagher et al., 2021; Lanfranco et al., 2024). De ce fait, nous avons défini les répondeurs à la RHI comme étant tout sujet sain qui avait une moyenne $\geq +1$ au questionnaire du SBO et/ou tout sujet sain qui avait un biais proprioceptif > 0 cm.

2.3.5. La stimulation transcrânienne direct à courant continu

Pour finir, la RHI est réalisée une seconde fois mais cette fois ci en même temps qu'une stimulation transcrânienne à courant direct (tDCS) (STARSTIM tES, Neuroelectrics®, Barcelona). Nous avons réalisé un montage bi-encéphalique avec l'anode placée au niveau du cortex préfrontal dorsolatéral gauche et la cathode placée au niveau cortex orbitofrontal droit (Eyraud et al., 2024). Les électrodes ont donc été disposées selon le système international 10/20 EEG en regard de F3 (CPFDL gauche) et Fp2 (région supraorbitaire droite) (Figure 4). Les électrodes étaient maintenues en place par un casque souple marqué par le système EEG 10/20 permettant ainsi d'établir des points de stimulations reproductibles d'un participant à l'autre. L'intensité du courant était de 2mA, sur des éponges de 25 cm2, avec une période ramp-up et ramp-down de 30 secondes : la RHI avec le premier pointage du biais proprioceptif commençait après la période ramp-up et le deuxième pointage était réaliser avant le début de la période ramp-down. La tDCS on-line était activée uniquement lors de la réalisation des conditions de la RHI (la tDCS était éteinte après chaque condition et durant le remplissage du questionnaire). Une échelle de tolérance de la tDCS (Brunoni et al., 2011) a été réalisée après la session de RHI+tDCS afin d'explorer les effets indésirables attendus de la tDCS.

Figure 4 : Modélisation de la diffusion du courant tDCS à 2 mA avec l'anode sur le cortex préfrontal dorsolatéral gauche (F3 selon le système EEG 10/20) et la cathode sur la région supraorbitaire droite (Fp2 selon le système EEG 10/20). Logiciel Neuroelectric v2.0.11.8.



Abréviations : mA : milliampères, tDCS : stimulation transcrânienne à courant continu, EEG : électro-encéphalogramme.

2.4. Analyses statistiques

Après avoir vérifié l'absence de normalité des distributions avec le test de Shapiro-Wilk, nous avons basé nos analyses sur des tests non-paramétriques.

Pour les données cliniques et sociodémographiques, qui sont exprimées en valeurs moyennes ± standards déviations, ou en effectifs avec les pourcentages correspondants, les comparaisons intergroupes ont été réalisées avec le test *U* de

Mann-Whitney pour les variables quantitatives et le test de Friedman pour les variables qualitatives.

Concernant les données de la RHI, qui sont exprimées en valeurs médianes et intervalles de confiance à 95% (IC 95%), les comparaisons intergroupes (entre les sujets sains, TSPT et TSPT-DS) ont été réalisées avec le test de Kruskal-Wallis. Pour les comparaisons des valeurs médianes du SBO et du SoA avec les valeurs médianes contrôles respectives dans chacun des groupes et dans chacune des conditions (active synchrone, active asynchrone, passive synchrone) nous avons utilisé le test des rangs signés de Wilcoxon pour données appariées. Ce même test des rangs signés de Wilcoxon pour données appariées a été utilisé pour comparer les performances de la RHI sans la tDCS *versus* avec la tDCS *on-line* dans chacun des groupes et dans chacune des conditions de la RHI. Nous avons utilisé le test de Friedman pour comparer les effets indésirables mineurs de la tDCS dans chaque groupe. Le seuil de significativité était fixé à 5%. Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel IBM® SPSS® Statistics V23.0.

2.5. Éthique

Cette étude a été approuvée par le Comité de Protection des Personnes (n°ID RCB 2020-A01307-32 – CPP 1-20-055 ID 8745). Elle a été menée conformément à la Déclaration d'Helsinki (2013) et à la législation française. Tous les participants ont donné leur consentement libre et éclairé par écrit.

3. Résultats

3.1. Caractéristiques de l'échantillon

Notre échantillon est composé de 28 sujets avec un âge moyen de 25.75 ± 7.14 ans, incluant 24 femmes (86%), avec un score moyen au test de latéralisation d'Edinburgh de 49.40 ± 19.55. Les trois sous-groupes (12 sujets sains, 8 patients avec un TSPT et 8 patients avec un TSPT de type dissociatif) étaient équilibrés en âge, sexe et score de latéralisation. Le tableau 2 détaille les caractéristiques sociodémographiques et cliniques des patients souffrant d'un TSPT selon le sous-type dissociatif. Chez nos patients, le TSPT était secondaire à l'exposition directe à l'un des évènements index suivants : une agression sexuelle pour 9 patients (56%), une maladie ou blessure grave pour 3 patients (19%), une agression physique pour 2 patients (13%) et des négligences sévères dans l'enfance pour 2 patients (13%). Un seul patient était sous antipsychotique et aucun patient ne prenait de benzodiazépine.

Tableau 2 : Caractéristiques sociodémographiques et cliniques des patients souffrant d'un trouble de stress post-traumatique.

	TSPT (n=8)	TSPT-DS (n=8)	p-values
Âge (en années)	27.50 ± 7.29	24.13 ± 5.19	0.442
Fluoxétine équivalent (en milligrammes)	3.00 ± 7.01	21.25 ± 27.48	0.130
Edinburgh Handedness Inventory	53.47 ± 20.53	48.03 ± 21.58	0.721
Dissociative Experience Scale	30.04 ± 17.78	48.74 ± 19.11	**< 0.0001**
TIS-Immobilité Tonique	15.00 ± 7.52	20.38 ± 2.56	0.195
TIS-Peur	7.75 ± 2.87	6.75 ± 1.91	0.442
TIS-Dissociation	7.88 ± 3.56	4.50 ± 1.50	0.284
CTQ-Négligences Émotionnelles	48.38 ± 22.28	40.00 ± 9.49	0.574
CTQ-Abus Émotionnels	31.50 ± 9.49	30.63 ± 10.80	0.959
CTQ-Abus Sexuels	6.88 ± 2.42	9.88 ± 5.33	0.382
CTQ-Abus Physiques	15.88 ± 11.48	17.88 ± 5.59	0.234
CTQ-Négligences Physiques	11.75 ± 3.81	10.75 ± 4.68	0.382
CTQ-Total Score	114.38 ± 34.56	109.13 ± 32.36	0.798
Beck Depression Inventory – 13 items	11.50 ± 6.63	16.63 ± 9.32	0.130
Traumas d'exposition directes sur la vie entière	2.75 ± 0.71	3.50 ± 1.77	0.574
Traumas d'exposition indirectes sur la vie entière	0.63 ± 0.74	1.38 ± 1.85	0.645
Traumas par annonce sur la vie entière	1.00 ± 0.76	0.63 ± 0.92	0.382
Nombre d'expositions traumatiques totale	4.63 ± 1.60	5.50 ± 3.42	0.798
Ancienneté du trauma index (en mois)	47.88 ± 50.15	31.25 ± 24.05	0.878
PCL-5 Symptômes de répétition	12.13 ± 3.36	12.63 ± 3.96	0.798
PCL-5 Comportements d'évitement	3.88 ± 1.55	5.88 ± 2.23	0.065
PCL-5 Humeur et cognitions négatives	18.75 ± 5.15	15.13 ± 4.61	0.279
PCL-5 Hyperéveil	12.75 ± 3.45	15.00 ± 5.29	0.442
PCL-5 Score total	47.50 ± 10.50	48.63 ± 12.60	1
Ancienneté du TSPT (en mois)	45.31 ± 49. 41	26.44 ± 19.89	0.645

Les données sont exprimées en valeurs moyennes ± écart types. Le test U de Mann-Whitney a été effectué pour les comparaisons inter-groupes. Abréviations : CTQ ; Childhood Trauma Questionnaire ; PCL-5 ; PTSD Checklist for DSM-5 ; TSPT : Trouble de stress post-traumatique ; TIS : Tonic Immobility Scale.

3.2. Objectif principal

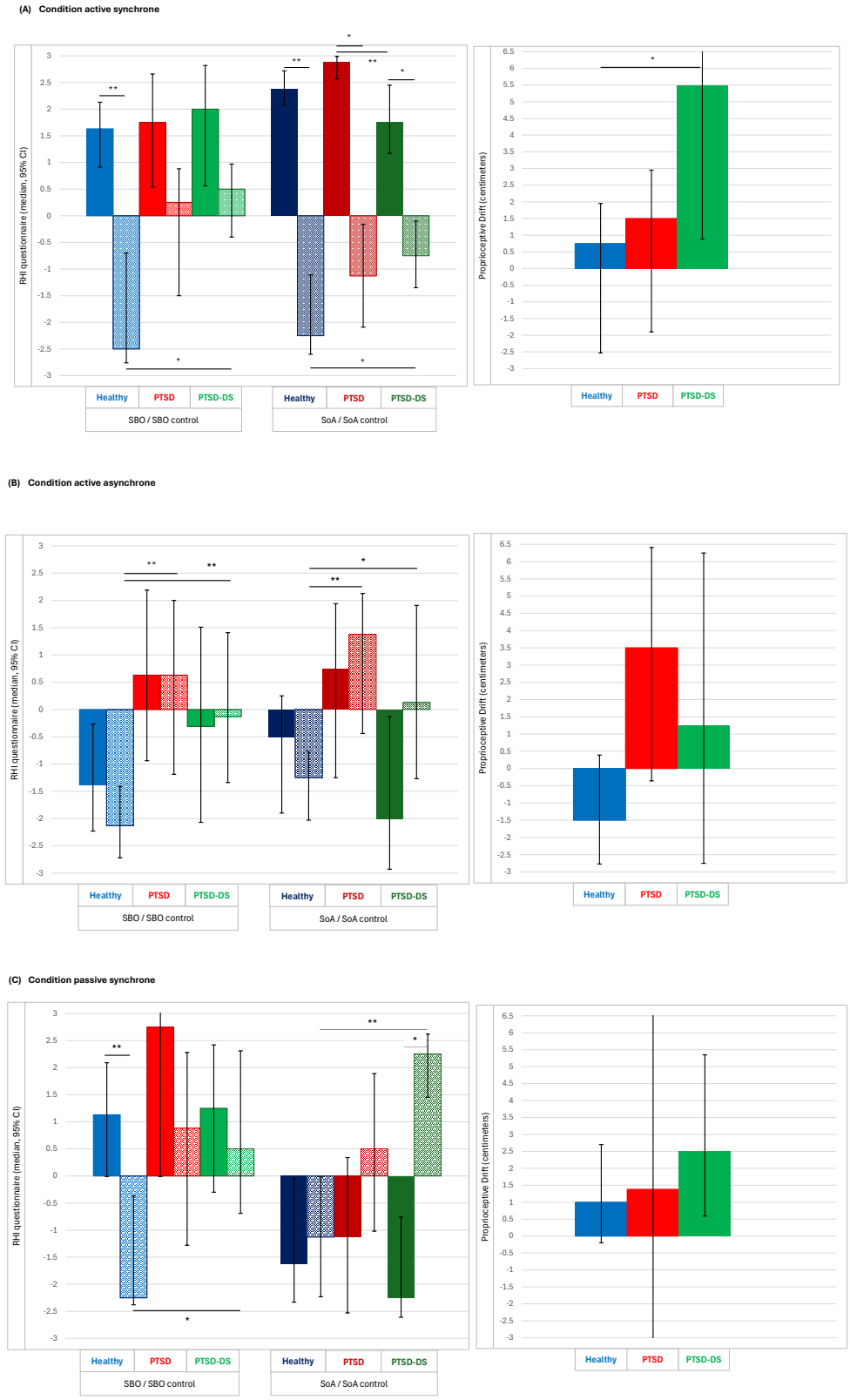
L'ensemble des résultats concernant les scores de la RHI sont résumés dans la Figure 5. Dans la condition active synchrone (Figure 5A), on observe que les trois groupes ont bien ressenti une illusion perceptive à la RHI avec des scores médians > +1 mais seul le groupe des sujets sains a présenté une différence significative entre le score médian SBO et le score médian SBO contrôle. Concernant le SoA, les trois groupes ont également bien ressenti un SoA avec des scores médians > +1 et tous les scores médians du SoA étaient significativement plus élevés que leurs scores contrôles respectifs. Enfin, concernant le biais proprioceptif, les trois groupes avaient un biais proprioceptif médian positif tout en considérant que le biais proprioceptif médian du groupe TSPT-DS était significativement plus élevé que le biais proprioceptif médian des sujets sains.

Concernant la condition active asynchrone (Figure 5B), on observe que les trois groupes n'ont plus d'illusion perceptive à la RHI avec des scores médians SBO qui

sont tous < +1. Concernant le SoA, les scores médians sont neutres dans le groupe des sujets sains et le groupe TSPT, avec des scores médians compris entre +1 et –1, et un score médian négatif < –1 dans le groupe TSPT-DS. Concernant les scores SoA contrôles, on remarque une anomalie dans le groupe TSPT avec un score médian > +1. Une analyse item par item (Tableau 3) a mis en évidence des différences significatives entre les sujets sains et les patients souffrant d'un TSPT pour les questions Q2 (« *Je sentais comme si la main en caoutchouc contrôlait mes mouvements* ») et Q4 (« *C'était comme si la main en caoutchouc avait sa propre volonté* ») mais sans différence significative entre le groupe TSPT et TSPT-DS. Cependant, on remarque un gradient apparaitre à la Q4 entre les différents groupes avec un score médian négatif dans le groupe sujet sain et de plus en plus positif entre les groupes TSPT et TSPT-DS. Concernant les biais proprioceptifs dans la condition active asynchrone, le biais proprioceptif médian était négatif dans le groupe des sujets sains et positif dans les groupes TSPT et TSPT-DS mais sans différence significative inter-groupe.

Enfin, dans la condition passive synchrone (Figure 5C), on observe que les trois groupes ont bien ressenti une illusion perceptive à la RHI avec des scores médians SBO > +1 mais seul le groupe des sujets sains présente une différence significative entre le score médian SBO et le score médian SBO contrôle, soit une configuration semblable à la condition active synchrone. Concernant le SoA, aucun des trois groupes n'a ressenti un SoA avec des scores médians qui étaient tous < –1 mais on remarque une anomalie dans le score médian contrôle du SoA dans le groupe TSPT-DS qui était > +1. Une analyse item par item (Tableau 3) a mis en évidence des scores significativement différents entre le groupe des sujets sains et le groupe TSPT-DS pour les questions Q1 (« *Je sentais comme si la main en caoutchouc contrôlait ma volonté* »), Q2 (« *Je sentais comme la main en caoutchouc contrôlait mes mouvements* ») et Q4 (« *C'était comme si la main en caoutchouc avait sa propre volonté* ») mais sans différence significative entre les groupes TSPT et TSPT-DS. Cependant, on remarque un gradient des scores médians pour chacun de ces items et notamment une valeur médiane positives à la Q1 pour le groupe TSPT-DS alors que la valeur médiane est négative dans les deux autres groupes. Globalement, le groupe TSPT-DS a des médianes élevées avec des IC95% positifs à tous les items d'agentivité contrôle témoignant d'une forte altération de la discrimination soi-autrui. Concernant le biais proprioceptif, les valeurs médianes étaient positives dans les trois groupes sans différence significative intergroupe en condition passive synchrone.

Figure 5 : Résultats des scores de l'illusion de la main en caoutchouc dynamique



Les données sont exprimées en valeurs médianes et IC95%. Les comparaisons intergroupes ont été réalisées avec le test de Kruskal-Wallis. Les comparaisons entre les valeurs médianes du SBO et SoA avec leurs valeurs médianes contrôles respectives dans chacun des groupes et condition a été réalisées avec le test des rangs signés de Wilcoxon pour données appariées. (*) p < 0.05. (**) p < 0.01. Abréviations : SBO : Sense of Body Ownership ; SoA : Sense

of Agency ; PTSD : Post-Traumatic Stress Disorder ; PTSD-DS : Post-Traumatic Stress Disorder – Dissociative Subtype.

Tableau 3 : Analyses item par item des questions contrôles du sens d'agentivité en condition active asynchrone et passive synchrone

	Control	PTSD	PTSD-DS	p-values
AA - AgC				
Q1	–2.5 [–2.94; –1.06]	1 [–1.58; 2.08]	–0.5 [–1.58; 2.08]	0.14
Q2	–3 [–2.92; –0.42]	1 [–1.21; 2.46]	1 [–1.64; 2.64]	0.04*
Q3	–2 [–2.55; –0.11]	1 [–1.21; 2.46]	–0.5 [–2.60; 1.60]	0.17
Q4	0 [–1.61; 0.95]	2 [0.83; 2.92]	3 [1.20; 3.55]	0.002*
PS - AgC				
Q1	–3 [–3.03; –0.30]	–2 [–2.77; 1.52]	2 [1.37; 2.63]	0.009**
Q2	–2.5 [–2.80; 0.13]	1.5 [–1.32; 2.57]	2.5 [1.75; 3.00]	0.008**
Q3	0.5 [–1.65; 1.31]	1 [–1.27; 2.52]	2 [0.22; 3.03]	0.175
Q4	–2 [–2.48; 0.31]	2 [–0.74; 2.99]	3 [0.27; 3.73]	0.011**

Les données sont exprimées en valeurs médiane et IC 95%.

Les analyses ont été réalisées avec le test de Kruskal-Wallis.

(*) Control < PTSD = PTSD-DS

(**) Control < PTSD-DS

Q1: Je sentais comme si la main en caoutchouc contrôlait ma volonté

Q2: Je sentais comme si la main en caoutchouc contrôlait mes mouvements

Q3: Je pouvais sentir le mouvement quelque part entre ma vraie main et la main en caoutchouc

Q4: C'était comme si la main en caoutchouc avait sa propre volonté

AA-AgC : Active asynchrone condition - Agentivité Contrôle

PS-AgC : Passive asynchrone condition - Agentivité Contrôle

3.3. Objectifs secondaires

Les effets de la tDCS *on-line* sur les performances de la RHI dynamique dans les trois conditions et pour chacun des trois groupes sont résumés dans le tableau 4. Les résultats ont montré une augmentation significative des scores médians du SoA dans le groupe des sujets sains ($p = 0.0011$) et TSPT-DS ($p = 0.018$) en condition active synchrone mais également une nette tendance à prendre en compte dans le groupe TSPT ($p = 0.059$) surtout en considérant la faible marge de progression qui était possible. On retrouve également une réduction significative des scores médians du SBO en condition active synchrone pour les sujets sains ($p = 0.007$) et dans la condition passive synchrone dans le groupe TSPT ($p = 0.043$). Les résultats concernant les effets indésirables et la tolérance de la tDCS sont résumés dans le tableau 5 et ne montre que des effets indésirables mineurs sans différence significative intergroupe ($p = 0.878$).

Tableau 4 : Les effets de la tDCS *on-line* sur les performances de la RHI dynamique

	Control (n=12)			PTSD (n=8)			PTSD-DS (n=8)		
	RHI	RHI + tDCS	*p*	RHI	RHI + tDCS	*p*	RHI	RHI + tDCS	*p*
Active synchronous cond.									
Body Ownership	1.63 [0.91; 2.13]	0.00 [−1.09 ; 1.25]	**0.007**	1.75 [−0.54 ; 2.66]	1.38 [−1.93 ; 2.55]	0.611	2.00 [0.56 ; 2.82]	0.75 [−0.90 ; 2.21]	0.352
Body Ownership Control	−2.50 [−2.76 ; −0.70]	−2.50 [−2.76 ; −1.37]	0.483	0.25 [−1.50 ; 0.88]	0.25 [−2.21 ; 1.71]	0.866	0.50 [−0.40 ; 0.97]	−0.38 [−0.84 ; 0.59]	0.068
Agency	2.38 [2.07 ; 2.72]	3.00 [2.62 ; 3.00]	**0.011**	2.88 [2.57 ; 2.99]	3	0.059	1.75 [1.17 ; 2.45]	2.88 [2.08 ; 3.11]	**0.018**
Agency Control	−2.25 [−2.60 ; −1.11]	−2.88 [−2.86 ; −2.01]	0.053	−1.13 [−2.09 ; −0.16]	−1.75 [−2.57 ; −1.10]	0.352	−0.75 [−1.35 ; 0.10]	−1.25 [−2.16 ; −0.16]	0.325
Proprioceptive Drift (cm)	0.75 [−2.53 ; 1.95]	−1.25 [−2.02 ; 0.82]	0.753	1.50 [−1.90 ; 2.95]	2.38 [−1.91 ; 5.53]	0.573	5.50 [0.88 ; 11.35]	−0.63 [−3.34 ; 2.90]	0.123
Active asynchronous cond.									
Body Ownership	−1.38 [−2.23 ; −0.27]	−1.25 [−1.85 ; −0.32]	0.776	0.63 [−0.94 ; 2.19]	1.63 [−0.30 ; 2.93]	0.344	−0.31 [−2.07 ; 1.51]	−1.38 [−2.24 ; 0.30]	0.753
Body Ownership Control	−2.13 [−2.72 ; −1.41]	−3.00 [−3.05 ; 1.54]	0.260	0.63 [−1.19 ; 2.00]	0.50 [−1.21 ; 2.03]	0.786	−0.13 [−1.34 ; 1.41]	−0.88 [−1.94 ; 1.06]	0.889
Agency	−0.50 [−1.54 ; 0.25]	−0.13 [−1.33 ; 0.37]	0.878	0.75 [−1.25 ; 1.94]	1.75 [−1.26 ; 2.70]	0.201	−2.00 [−2.93 ; −0.13]	−0.63 [−2.24 ; 1.30]	0.206
Agency Control	−1.25 [−2.03 ; −0.76]	−2.25 [−2.65 ; −1.43]	0.096	1.38 [−0.44 ; 2.13]	0.00 [−0.58 ; 1.27]	0.344	0.13 [−0.91 ; 1.91]	−0.50 [−1.11 ; 0.74]	0.263
Proprioceptive Drift (cm)	−1.50 [−2.77 ; 0.39]	−1.13 [−2.26 ; 1.09]	0.583	3.50 [−0.36 ; 6.41]	1.25 [−0.51 ; 4.26]	0.441	1.25 [−2.78 ; 6.59]	0.00 [−4.73 ; 2.79]	0.440
Passive synchronous cond.									
Body Ownership	1.13 [−0.01 ; 2.09]	−0.75 [−1.35 ; 1.23]	0.077	2.75 [−0.01 ; 3.39]	1.88 [−1.31 ; 2.88]	**0.043**	1.25 [−0.30 ; 2.42]	1.63 [0.47 ; 2.45]	0.612
Body Ownership Control	−2.25 [−2.38 ; −0.37]	−2.88 [−3.00 ; −1.00]	0.191	0.88 [−1.28 ; 2.28]	−0.13 [−2.16 ; 2.03]	0.497	0.50 [−0.69 ; 1.81]	1.25 [−0.21 ; 2.46]	0.090
Agency	−1.62 [−2.33 ; −0.05]	−1.00 [−1.85 ; −0.23]	0.553	−1.13 [−2.53 ; 0.34]	−1.75 [−2.84 ; −0.10]	0.600	−2.25 [−2.61 ; −0.76]	−1.38 [−2.09 ; −0.66]	0.326
Agency Control	−1.12 [−2.14 ; −0.02]	−1.50 [−2.19 ; 0.02]	1	0.5 [−1.01 ; 1.89]	0.75 [−0.51 ; 2.26]	0.528	2.25 [1.45 ; 2.62]	1.38 [0.49 ; 2.26]	0.058
Proprioceptive Drift (cm)	1.00 [−0.20 ; 2.70]	−0.25 [−1.54 ; 1.67]	0.051	1.38 [−5.28 ; 8.34]	2.00 [−0.16 ; 7.72]	0.483	2.50 [0.59 ; 5.35]	2.88 [0.96 ; 5.29]	0.866

Les données sont exprimées en valeurs médianes avec IC95%. Les comparaisons ont été réalisées avec le test des rangs signés de Wilcoxon pour données appariées. Abrévitations : RHI : Rubber Hand Illusion ; tDCS : transcranial Direct Current Stimulation.

Tableau 5 : Liste des effets indésirables mineurs de la tDCS rapportés par les participants

	Sujet sains (n=12)	TSPT (n=8)	TSPT-DS (n=8)	p-value
Douleur de nuque	1	0	0	0.878
Douleur cuir chevelu	0	0	1	
Picotements	7	7	3	
Démangeaisons	1	3	0	
Sensation de brulure	1	3	2	
Fatigue	1	0	1	
Trouble de l'attention	2	1	2	
Variation de l'humeur	0	0	0	
Autre	0	0	0	

Les données sont exprimées en effectifs avec des comparaisons intergroupes réalisées par le test de Friedman. Abréviations : TSPT : Trouble de Stress Post-Traumatique ; TSPT-DS : Trouble de Stress Post-Traumatique – Dissociative Subtype ; tDCS : transcranial Direct Current Stimulation.

4. Discussion

Nos travaux s'intéressent à la conscience du corps dans le TSPT en fonction du sous-type dissociatif en utilisant la RHI dynamique, un paradigme expérimental permettant d'évaluer à la fois de SBO et le SoA (Kalckert & Ehrsson, 2012). Les trois groupes étaient équilibrés en âge, sexe et degré de latéralisation limitant ces facteurs de confusion majeurs. Dans le groupe des sujets sains, les scores positifs du SBO et du SoA dans la condition de référence active synchrone, avec des valeurs médianes significativement plus élevées que les médianes négatives des items contrôles, permettent de valider notre procédure expérimentale. Nous pouvons affirmer que la RHI dynamique a été réalisée correctement avec des résultats conformes aux études de référence pour les sujets sains (Kalckert & Ehrsson, 2012 ; 2014). Cette validation est une étape nécessaire avant d'analyser des situations pathologiques. Ensuite, notre étude a l'avantage d'avoir appliqué des critères d'inclusion rigoureux afin de sélectionner des sujets sains dont l'absence de trouble psychique a été confirmée par des échelles psychométriques. Contrairement à certaines études qui incluent des patients avec des TSPT secondaires à différents types d'exposition traumatique, nos patients souffraient tous d'un TSPT apparu après une exposition directe à un évènement traumatique. Ce critère d'inclusion nous a permis d'homogénéiser notre échantillon limitant les potentiels biais de confusion. De plus, l'absence de différence significative entre le groupe des TSPT et TSPT-DS sur les principales variables socio-démographiques et cliniques étudiées limitent les autres biais de confusion considérés. On retrouve cependant des scores moyens de dissociation à la DES qui étaient significativement plus élevés dans le groupe TSPT-DS que dans le groupe TSPT. C'était un résultat attendu et conforme aux données de la littérature qui indiquent que le niveau de dissociation est plus faible pour les TSPT que pour les troubles dissociatifs (Lyssenko et al., 2018). Nos résultats vont dans ce sens et tendent à confirmer la pertinence d'avoir déterminé le groupe TSPT-DS selon les scores de déréalisation et dépersonnalisation de la CAPS-5.

La RHI dynamique ne nous a pas permis de mettre en évidence une hyper-rigidité des représentations mentales corporelles dans le TSPT contrairement à nos hypothèses. Dans la condition active synchrone, on observe que les trois groupes ont bien ressenti une illusion à la RHI dynamique (y compris dans le groupe TSPT), que

ce soit dans les mesures subjectives et objectives, témoignant d'une mise à jour des représentations mentale pour corriger l'erreur de prédiction. Contrairement à nos hypothèses, nos résultats diffèrent de l'étude de Rabellino et al. (2018) dans laquelle les patients avec un TSPT n'avaient pas d'illusion à la RHI classique. Cette différence de résultats peut s'expliquer par des variabilités méthodologiques, notamment la très petite taille de l'échantillon dans l'étude de Rabellino et al. (2018) qui rendait les mesures plus facilement biaisées par la présence d'éventuels non-répondeurs à la RHI. Une autre explication serait que la RHI dynamique mobilise des informations sensorielles spécifiques proprio-kinesthésiques qui seraient plus saillantes que les stimulations tactiles de la RHI classique. En conséquence, les erreurs de prédiction seraient plus fortes et fiables capables d'induire une mise à jour perceptuelle, y compris dans le TSPT avec un probable effet seuil. De plus, considérant que le SBO et le SoA sont en interaction (Kalckert & Ehrsson 2012, 2014), l'illusion dans le groupe TSPT a pu être renforcée par le fort niveau de SoA qui étaient significativement plus élevées que le groupe TSPT-DS. Le haut niveau du SoA dans le groupe TSPT pourrait s'expliquer par l'hyperactivité de l'insula antérieure caractéristique du TSPT (Lebois et al., 2022; Nicholson, Harricharan, et al., 2020; Nicholson, McKinnon, et al., 2020). En effet, l'insula antérieure joue un rôle important dans l'attribution de l'actions à soi, aussi appelé le phénomène de « *self-agency* » (Craig, 2009; Farrer & Frith, 2002). Ainsi, l'hyperactivité de l'insula antérieure dans le TSPT renforce le processus du « *self-agency* » en cas de mouvements volontaires, ce qui est le cas dans la condition active synchrone.

L'une de nos hypothèses concernant l'hyper-malléabilité du SBO dans le TSP-DS a été vérifiée quand on regarde le biais proprioceptif très élevé du groupe TSPT-DS dans la condition active synchrone, un résultat similaire à l'étude de Rabellino et al. (2018). Cette forte dérive proprioceptive dans la dissociation peut s'expliquer par l'hyperactivation du gyrus angulaire droit en cas d'erreur de prédiction, ce qui est le cas dans la condition active synchrone, ce qui a pour conséquence d'augmenter l'attention exogène sur les informations sensorielles extérieures, ce qui augmente leur saillance et renforce la dérive proprioceptive (de Boer et al., 2020). La forte dérive proprioceptive dans le groupe TSPT-DS peut aussi s'expliquer par une sous-modulation des informations sensorielles par les croyances. Cette hyporégulation serait causées par des prédictions et des croyances affaiblies du fait de l'anesthésie émotionnelle, conséquence de la déconnexion fronto-limbique. La modulation des entrées sensorielles dans la dissociation est rendue d'autant plus difficile par l'hypofonctionnement glutamatergique / *N-methyl-D-aspartate receptor* qui sont des éléments essentiels de régulation descendante dans la théorie prédictive (Boroujeni & Womelsdorf, 2023; Fazekas & Nanay, 2021).

Pour finir sur la condition active synchrone, il est intéressant de souligner le gradient des mesures à la RHI entre les sujets sains, le groupe TSPT puis le groupe TSPT-DS, et tout particulièrement avec le SoA contrôle et le SBO contrôle dont les valeurs médianes se rapprochent de plus en plus du zéro - ou des valeurs positives - ce qui traduit une difficulté croissante à distinguer le soi-autrui. Cette fragilité croissante de la conscience corporelle s'exprimerait cliniquement par des symptômes dissociatifs de plus en plus intenses entre le TSPT et le TSPT-DS, un continuum mis en évidence cliniquement dans une méta-analyse qui a évalué l'intensité des

expériences dissociatives dans les troubles psychiatriques au moyen de la Dissociative Experience Scale (Lyssenko et al., 2018).

Dans la condition active asynchrone, nos résultats ont montré que l'introduction d'un biais temporel, abolissant le SBO, a un impact sur le SoA dans les groupes TSPT et TSPT-DS. Sans le SBO et sa capacité princeps à discriminer le soi et le non-soi, le SoA du groupe TSPT a été fragilisé avec un début d'influence extérieure sur la motricité et la volonté. Ce phénomène pourrait s'expliquer par l'hyperglutamatergie qui caractérise le TSPT (Averill & Abdallah, 2022; Prajapati et al., 2025). L'excès de glutamate pourrait provoquer un excès d'amplification attentionnelle (Boroujeni & Womelsdorf, 2023; Fazekas & Nanay, 2021) et affecter des informations sensorielles du soi, qui sont habituellement atténuées et nécessitant peu d'attention. Une fois l'amplification attentionnelle réalisée sur une information sensorielle de soi, elle peut être reconnue comme étant du non-soi, c'est à dire une information sensorielle non-atténuée nécessitant des ressources attentionnelles plus élevées, et ainsi générer une sensation d'être contrôlée par le monde extérieur. Ce phénomène semble limité dans le TSPT et compensé par le SBO. Pour le groupe TSPT-DS, il n'y avait pas de SoA en condition active asynchrone. Le SoA semble trop faible pour s'exprimer seul et il semble avoir besoin d'être stabilisé et renforcé par le SBO. Dans cette situation, il n'y a plus de dissociation entre le SBO et le SoA.

Dans la condition passive synchrone, c'est le groupe TSPT-DS qui a été particulièrement impacté avec des anomalies de la discrimination soi-autrui, notamment le ressenti que la motricité et la volonté des patients étaient sous le contrôle de l'extérieur. La stabilité de la conscience du corps dans le TSPT-DS est donc dépendante de l'atténuation sensorielle générée par le SoA (Blakemore et al., 2000). On pourrait expliquer cette situation par l'hypoglutamatergie qui caractérise la dissociation qui limite l'amplification attentionnelle aboutissant à des difficultés de discrimination entre les informations sensorielles du soi et du non-soi qui peuvent alors se confondre (Averill & Abdallah, 2022). Lors de la réalisation d'un mouvement volontaire, la concordance entre la prédiction motrice et le retour sensoriel génère le SoA qui induit une atténuation sensorielle, c'est-à-dire que les informations sensorielles correctement prédites sont atténuées, attribuées à soi, afin de les distinguer des informations du non prédites du non-soi qui deviennent plus saillantes en mobilisant plus de ressources attentionnelles (amplification attentionnelle) (Frith et al., 2000; Kilteni & Ehrsson, 2017). Dans le contexte d'hypoglutamatergie induisant un déficit d'amplification attentionnelle dans la dissociation, l'atténuation sensorielle du SoA devient un élément essentiel pour discriminer les informations sensorielles du soi. Malgré ces anomalies de la conscience du corps, il est très important de remarquer que les trois groupes ont une cohérence centrale préservée, c'est-à-dire qu'ils font la différence entre une condition asynchrone (sans illusion) et une condition synchrone (avec une illusion). La préservation de la cohérence centrale dans le TSPT et le TSPT-DS va nous permettre de les distinguer d'autres troubles mentaux comme la schizophrénie qui est caractérisée par une incohérence perceptuelle (Postmes et al., 2014).

La stimulation anodale du CPFdl gauche a provoqué une augmentation du SoA dans tous les groupes de notre étude en condition active synchrone. Ces résultats sont

conformes aux données de la littérature qui montrent que la stimulation anodale du CPFdl gauche améliore le SoA en renforçant le liage intentionnel (Khalighinejad et al., 2016). Quand on mesure le délai entre la réalisation d'une action et ses conséquences, le délai perçu est plus court pour les actions volontaires que pour les actions involontaires, cette compression temporelle propre aux actions volontaires défini le liage intentionnel qui est d'autant plus fort que le SoA est fort (Haggard et al., 2002). La participation du CPFdl gauche pour renforcer le liage intentionnel ne se produit que pour des actions endogènes, c'est à dire des actions volontaires, avec une intention, et réalisées activement par soi-même (Khalighinejad et al., 2016). Nos résultats vont dans ce sens avec un renforcement du SoA uniquement en condition active synchrone, et de manière intéressante ce phénomène est retrouvé à la fois chez les sujets sains mais aussi dans les groupes malades TSPT et TSPT-DS. Il semble que cette fonction du CPFdl gauche sur le SoA est conservé dans le TSPT, avec ou sans dissociation, et ne semble donc pas participer à la physiopathologie de ces troubles. Nos résultats suggèrent cependant que le renforcement du liage intentionnel par le CPFdl gauche se produit même en situation d'erreur de prédiction corrigée (condition active synchrone), l'importance étant la production d'un mouvement volontaire endogène. Chez les sujets sains, cette augmentation du SoA avec la tDCS *on-line* était associée à une réduction significative de l'illusion perceptuelle de la RHI. Il est probable que la stimulation anodale du CPFdl gauche a augmenté son contrôle descendant sur les processus d'intégration sensorielle (Cao et al., 2023; Rolls et al., 2023), et/ou renforcé les croyances prédictives (représentations interne de soi) (Alexander & Womelsdorf, 2021), qui sont dès lors moins sensibles aux mises à jour avec des entrées sensorielles qui s'en retrouvent d'autant plus modulées. Cette baisse de l'illusion perceptuelle à la RHI n'a pas eu lieu dans les groupes TSPT et TSPT-DS, conséquences très probables d'altération de la connectivité cérébrale avec des capacités de neuroplasticité faible chez les personnes souffrant d'un TSPT (Pivac et al., 2023).

Malgré son intérêt, notre travail présente plusieurs limites. L'étude est basée sur un petit nombre de participants ce qui en limite la puissance. Les questionnaires de la RHI que nous avons utilisés ont été traduit de l'anglais en français mais la version française du questionnaire n'a pas encore été validée. Cette question de la validation des questionnaires de la RHI, même en version anglaise, commence à émerger dans la littérature (Tosi et al., 2024). De plus, les questionnaires de la RHI sont très sensibles à l'influence des biais cognitifs tels que les biais de motivation, de performance, de désirabilité ou d'autosatisfaction (Haggard et al., 2002). On peut également se poser la question d'un processus d'apprentissage de la RHI car chaque participant a réalisé deux fois l'expérience. Bien qu'il existe en effet un processus d'apprentissage dans la RHI (Lev-Ari et al., 2015), ce dernier demande en général plus de répétition et nous avons tenté de limiter cet apprentissage en sélectionnant des participants naïfs de la RHI. Nous n'avons pas évalué les fonctions cognitives des participants alors que le TSPT est fréquemment associé à des troubles cognitifs (Jellestad et al., 2021) ce qui peut constituer un biais de confusion. Concernant, la condition active asynchrone, nous n'avons pas réussi à induire un SoA dans le groupe des sujets sains contrairement aux études princeps de la RHI dynamique en population générale (Kalckert & Ehrsson 2012, 2014). Il peut s'agir un problème technique, d'une mauvaise reproduction des études d'origine, ou l'effet de

population différentes avec dans notre étude des sujets confirmés par des mesures comme sains alors que les autres études étaient avec des sujets déclarés sains : nos sujets semblaient plus sensibles au biais temporel dans le SoA. De ce fait, l'interprétation des résultats dans la condition active asynchrone doit se faire avec prudence et réserve. Pour finir, nous avons basé notre étude sur l'utilisation de la RHI dynamique, c'est-à-dire que nous avons évaluer la conscience du corps au niveau de la main droite des participants. Il est légitime de se demander si le niveau de conscience corporelle des mains reflète le niveau de la conscience corporelle du reste du corps. Une large étude menée en population générale avec des questionnaires a montré une corrélation entre la qualité de la conscience du corps des zones distales avec les parties proximale (Hidaka et al., 2021). À l'inverse, des auteurs qui ont utilisé des paradigmes expérimentaux spécifiques ont montré que les mécanismes à la base de la conscience du corps entier seraient différents des mécanismes plus localisés de la conscience du corps aux niveau des membres (O'Kane et al., 2024).

Au total, les anomalies de la conscience du corps ont des signatures différentes selon la nature dissociative du TSPT. Essentiellement, le groupe TSPT se caractérise par un SoA élevé et une discrimination soi-autrui légèrement affectée par un biais temporel. Le groupe TSPT-DS présente un biais proprioceptif élevé (saillance de l'information extéroceptive), un SoA dépendant du SBO et une discrimination soi-autrui fortement dépendante de l'atténuation sensorielle des mouvements volontaires. Concernant la tDCS, elle améliore le SoA mais ne module pas le SBO chez les patients souffrant d'un TSPT ou TSPT-DS. Au vu de ces résultats, la tDCS présente un intérêt limité invitant les cliniciens et chercheurs à trouver d'autres cibles thérapeutiques plus pertinentes.

Financements : Aucun

Remerciements : Aucun

Conflits d'intérêt : Les auteurs déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêt à déclarer

Bibliographie

Alexander, W. H., & Womelsdorf, T. (2021). Interactions of Medial and Lateral Prefrontal Cortex in Hierarchical Predictive Coding. Frontiers in Computational Neuroscience, 15. https://doi.org/10.3389/fncom.2021.605271

American Psychiatric Association. (2013). Diagnostic and statistical manual of mental disorders (DSM-5®). American Psychiatric Pub.

Ashbaugh, A. R., Houle-Johnson, S., Herbert, C., El-Hage, W., & Brunet, A. (2016). Psychometric Validation of the English and French Versions of the Posttraumatic Stress Disorder Checklist for DSM-5 (PCL-5). PLoS ONE, 11(10). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161645

Averill, L. A., & Abdallah, C. G. (2022). Investigational drugs for assisting psychotherapy for posttraumatic stress disorder (PTSD) : Emerging approaches

and shifting paradigms in the era of psychedelic medicine. Expert Opinion on Investigational Drugs, 31(2), 133-137. https://doi.org/10.1080/13543784.2022.2035358

Barrett, L. F., & Simmons, W. K. (2015). Interoceptive predictions in the brain. Nature Reviews. Neuroscience, 16(7), 419-429. https://doi.org/10.1038/nrn3950

Beck, A. T., & Beamesderfer, A. (1974). Assessment of depression : The depression inventory. Modern Problems of Pharmacopsychiatry, 7(0), 151-169.

Bernstein, D. P., Ahluvalia, T., Pogge, D., & Handelsman, L. (1997). Validity of the Childhood Trauma Questionnaire in an adolescent psychiatric population. Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry, 36(3), 340-348. https://doi.org/10.1097/00004583-199703000-00012

Bernstein, D. P., & Fink, L. (1998). Childhood trauma questionnaire : A retrospective self-report: Manual. Harcourt Brace & Company.

Bernstein, D. P., Fink, L., Handelsman, L., Foote, J., Lovejoy, M., Wenzel, K., Sapareto, E., & Ruggiero, J. (1994). Initial reliability and validity of a new retrospective measure of child abuse and neglect. The American journal of psychiatry.

Bienvenu, T. C., Dejean, C., Jercog, D., Aouizerate, B., Lemoine, M., & Herry, C. (2021). The advent of fear conditioning as an animal model of post-traumatic stress disorder : Learning from the past to shape the future of PTSD research. Neuron, 109(15), 2380-2397.

Blake, D., Weathers, F., Nagy, L., Kaloupek, D., Klauminzer, G., Charney, D., & Keane, T. (1990). Clinician-administered PTSD scale (CAPS). Boston (Mass), 7.

Blakemore, S. J., Wolpert, D., & Frith, C. (2000). Why can't you tickle yourself? Neuroreport, 11(11), R11-16. https://doi.org/10.1097/00001756-200008030-00002

Boroujeni, K. B., & Womelsdorf, T. (2023). Routing states transition during oscillatory bursts and attentional selection. Neuron, 111(18), 2929-2944.e11. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2023.06.012

Botvinick, M., & Cohen, J. (1998). Rubber hands « feel » touch that eyes see. Nature, 391(6669), 756. https://doi.org/10.1038/35784

Bourque, P., & Beaudette, D. (1982). Étude psychometrique du questionnaire de dépression de Beck auprès d'un échantillon d'étudiants universitaires francophones. [Psychometric study of the Beck Depression Inventory on a sample of French-speaking university students.]. Canadian Journal of Behavioural Science / Revue canadienne des sciences du comportement, 14(3), 211-218. https://doi.org/10.1037/h0081254

Bovin, M. J., Marx, B. P., Weathers, F. W., Gallagher, M. W., Rodriguez, P., Schnurr, P. P., & Keane, T. M. (2016). Psychometric properties of the PTSD Checklist for Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders-Fifth Edition (PCL-5) in veterans. Psychological Assessment, 28(11), 1379-1391. https://doi.org/10.1037/pas0000254

Braun, N., Debener, S., Spychala, N., Bongartz, E., Sörös, P., Müller, H. H. O., & Philipsen, A. (2018). The Senses of Agency and Ownership : A Review. Frontiers in Psychology, 9, 535. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00535

Briere, J., & Rickards, S. (2007). Self-Awareness, Affect Regulation, and Relatedness : Differential Sequels of Childhood Versus Adult Victimization Experiences. The Journal of Nervous and Mental Disease, 195(6), 497. https://doi.org/10.1097/NMD.0b013e31803044e2

Brunoni, A. R., Amadera, J., Berbel, B., Volz, M. S., Rizzerio, B. G., & Fregni, F. (2011). A systematic review on reporting and assessment of adverse effects associated with transcranial direct current stimulation. The International Journal of Neuropsychopharmacology, 14(8), 1133-1145. https://doi.org/10.1017/S1461145710001690

Cao, J., Qu, Y., Chen, L., Liu, T., Guo, J., Gong, Y., Tian, Z., Xiong, J., Lin, Z., Yang, X., Yin, T., & Zeng, F. (2023). The regulations on cortical activation and functional connectivity of the dorsolateral prefrontal cortex-primary somatosensory cortex elicited by acupuncture with reinforcing-reducing manipulation. Frontiers in Human Neuroscience, 17. https://doi.org/10.3389/fnhum.2023.1159378

Carlson, E. B., & Putnam, F. W. (1993). An update on the dissociative experiences scale. Dissociation: progress in the dissociative disorders.

Chancel, M., Ehrsson, H. H., & Ma, W. J. (2022). Uncertainty-based inference of a common cause for body ownership. eLife, 11, e77221. https://doi.org/10.7554/eLife.77221

Craig, A. D. B. (2009). How do you feel--now? The anterior insula and human awareness. Nature Reviews. Neuroscience, 10(1), 59-70. https://doi.org/10.1038/nrn2555

Darves-Bornoz, J.-M., Degiovanni, A., & Gaillard, P. (1999). Validation of a French Version of the Dissociative Experiences Scale in a Rape-Victim Population. The Canadian Journal of Psychiatry, 44(3), 271-275. https://doi.org/10.1177/070674379904400308

de Boer, D. M. L., Johnston, P. J., Kerr, G., Meinzer, M., & Cleeremans, A. (2020). A causal role for the right angular gyrus in self-location mediated perspective taking. Scientific Reports, 10(1), 19229. https://doi.org/10.1038/s41598-020-76235-7

Dickstein, B., Weathers, F., Angkaw, A., Nievergelt, C., Yurgil, K., Nash, W., Baker, D., & Litz, B. (2014). Diagnostic Utility of the Posttraumatic Stress Disorder (PTSD) Checklist for Identifying Full and Partial PTSD in Active-Duty Military. Assessment, 22. https://doi.org/10.1177/1073191114548683

Draijer, N., & Boon, S. (1993). The validation of the Dissociative Experiences Scale against the criterion of the SCID-D, using receiver operating characteristics (ROC) analysis. Dissociation: Progress in the Dissociative Disorders, 6(1), 28-37.

Ehrsson, H. H. (2020). Multisensory processes in body ownership. In Multisensory Perception (p. 179-200). Elsevier.

Eyraud, N., Poupin, P., Legrand, M., Caille, A., Sauvaget, A., Bulteau, S., Gohier, B., Harika-Germaneau, G., Drapier, D., Jaafari, N., Bodic, O., Brizard, B.,

Gissot, V., Belzung, C., Courtine, J.-B., & El-Hage, W. (2024). Combining trauma script exposure with tDCS to alleviate symptoms of posttraumatic stress disorder : A two-arm randomized sham-controlled multicenter trial. Brain Stimulation: Basic, Translational, and Clinical Research in Neuromodulation, 17(3), 591-593. https://doi.org/10.1016/j.brs.2024.04.018

Farrer, C., & Frith, C. D. (2002). Experiencing oneself vs another person as being the cause of an action : The neural correlates of the experience of agency. NeuroImage, 15(3), 596-603. https://doi.org/10.1006/nimg.2001.1009

Fazekas, P., & Nanay, B. (2021). Attention Is Amplification, Not Selection. The British Journal for the Philosophy of Science, 72(1), 299-324. https://doi.org/10.1093/bjps/axy065

Ford, J. M., & Mathalon, D. H. (2019). Efference Copy, Corollary Discharge, Predictive Coding, and Psychosis. Biological Psychiatry: Cognitive Neuroscience and Neuroimaging, 4(9), 764-767. https://doi.org/10.1016/j.bpsc.2019.07.005

Forsyth, J. P., Marx, B., Fusé, T. M. K., Heidt, J., & Gallup, G. G. (2000). The Tonic Immobility Scale–Adult Form. Albany, NY: Authors.

Frith, C. (2012). Explaining delusions of control : The comparator model 20 years on. Consciousness and Cognition, 21(1), 52-54. https://doi.org/10.1016/j.concog.2011.06.010

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

Gallagher, M., Colzi, C., & Sedda, A. (2021). Dissociation of proprioceptive drift and feelings of ownership in the somatic rubber hand illusion. Acta Psychologica, 212, 103192. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2020.103192

Gallagher, S. (2000). Philosophical conceptions of the self : Implications for cognitive science. Trends in Cognitive Sciences, 4(1), 14-21. https://doi.org/10.1016/S1364-6613(99)01417-5

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

Haggard, P., Clark, S., & Kalogeras, J. (2002). Voluntary action and conscious awareness. Nature Neuroscience, 5(4), 382-385. https://doi.org/10.1038/nn827

Hidaka, S., Sasaki, K., Kawagoe, T., Asai, N., & Teramoto, W. (2021). Bodily ownership and agency sensations in a natural state. Scientific Reports, 11(1), 8651. https://doi.org/10.1038/s41598-021-87843-2

Jellestad, L., Vital, N. A., Malamud, J., Taeymans, J., & Mueller-Pfeiffer, C. (2021). Functional impairment in Posttraumatic Stress Disorder : A systematic review and meta-analysis. Journal of Psychiatric Research, 136, 14-22. https://doi.org/10.1016/j.jpsychires.2021.01.039

Kalckert, A., & Ehrsson, H. H. (2012). Moving a Rubber Hand that Feels Like Your Own : A Dissociation of Ownership and Agency. Frontiers in Human Neuroscience, 6, 40. https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00040

Kanai, R., Komura, Y., Shipp, S., & Friston, K. (2015). Cerebral hierarchies : Predictive processing, precision and the pulvinar. Philosophical Transactions of

the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, 370(1668), 20140169. https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0169

Kealy, D., Spidel, A., & Ogrodniczuk, J. S. (2017). Self-conscious emotions and suicidal ideation among women with and without history of childhood sexual abuse. Counselling and Psychotherapy Research, 17(4), 269-275. https://doi.org/10.1002/capr.12140

Khalighinejad, N., Di Costa, S., & Haggard, P. (2016). Endogenous Action Selection Processes in Dorsolateral Prefrontal Cortex Contribute to Sense of Agency : A Meta-Analysis of tDCS Studies of 'Intentional Binding'. Brain Stimulation, 9(3), 372-379. https://doi.org/10.1016/j.brs.2016.01.005

Kilteni, K., & Ehrsson, H. H. (2017). Body ownership determines the attenuation of self-generated tactile sensations. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 114(31), 8426-8431. https://doi.org/10.1073/pnas.1703347114

Knill, D. C., & Pouget, A. (2004). The Bayesian brain : The role of uncertainty in neural coding and computation. Trends in Neurosciences, 27(12), 712-719. https://doi.org/10.1016/j.tins.2004.10.007

Körding, K. P., Beierholm, U., Ma, W. J., Quartz, S., Tenenbaum, J. B., & Shams, L. (2007). Causal Inference in Multisensory Perception. PLOS ONE, 2(9), e943. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0000943

Köster, M., Kayhan, E., Langeloh, M., & Hoehl, S. (2020). Making Sense of the World : Infant Learning From a Predictive Processing Perspective. Perspectives on Psychological Science: A Journal of the Association for Psychological Science, 15(3), 562-571. https://doi.org/10.1177/1745691619895071

Krüger-Gottschalk, A., Knaevelsrud, C., Rau, H., Dyer, A., Schäfer, I., Schellong, J., & Ehring, T. (2017). The German version of the Posttraumatic Stress Disorder Checklist for DSM-5 (PCL-5) : Psychometric properties and diagnostic utility. BMC Psychiatry, 17(1), 379. https://doi.org/10.1186/s12888-017-1541-6

Kube, T., Berg, M., Kleim, B., & Herzog, P. (2020). Rethinking post-traumatic stress disorder—A predictive processing perspective. Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 113, 448-460. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2020.04.014

Kube, T., & Rozenkrantz, L. (2021). When Beliefs Face Reality : An Integrative Review of Belief Updating in Mental Health and Illness. Perspectives on Psychological Science: A Journal of the Association for Psychological Science, 16(2), 247-274. https://doi.org/10.1177/1745691620931496

Kuo, M.-F., Paulus, W., & Nitsche, M. A. (2014). Therapeutic effects of non-invasive brain stimulation with direct currents (tDCS) in neuropsychiatric diseases. NeuroImage, 85 Pt 3, 948-960. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.05.117

Lanfranco, R. C., Chancel, M., & Ehrsson, H. H. (2024). Texture congruence modulates perceptual bias but not sensitivity to visuotactile stimulation during the rubber hand illusion. Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience, 24(1), 100-110. https://doi.org/10.3758/s13415-024-01155-2

Laurin, A., Hardouin, J.-B., Pere, M., Fauvre, M., Bottemanne, H., Richieri, R., Brunet, A., Rötharmel, M., El-Hage, W., Bulteau, S., Deschamps, T., & Sauvaget, A. (2024). French validation of the tonic immobility scale in patients with post-traumatic stress disorder. European Journal of Trauma & Dissociation, 8(4), 100449. https://doi.org/10.1016/j.ejtd.2024.100449

Lebois, L. A. M., Harnett, N. G., van Rooij, S. J. H., Ely, T. D., Jovanovic, T., Bruce, S. E., House, S. L., Ravichandran, C., Dumornay, N. M., Finegold, K. E., Hill, S. B., Merker, J. B., Phillips, K. A., Beaudoin, F. L., An, X., Neylan, T. C., Clifford, G. D., Linnstaedt, S. D., Germine, L. T., … Ressler, K. J. (2022). Persistent Dissociation and Its Neural Correlates in Predicting Outcomes After Trauma Exposure. The American Journal of Psychiatry, 179(9), 661-672. https://doi.org/10.1176/appi.ajp.21090911

Lev-Ari, L., Hirschmann, S., Dyskin, O., Goldman, O., & Hirschmann, I. (2015). The Rubber Hand Illusion Paradigm as a Sensory Learning Process in Patients with Schizophrenia. European Psychiatry, 30(7), 868-873. https://doi.org/10.1016/j.eurpsy.2015.06.008

Liu, H., Wang, X., Gong, T., Xu, S., Zhang, J., Yan, L., Zeng, Y., Yi, M., & Qian, Y. (2024). Neuromodulation treatments for post-traumatic stress disorder : A systematic review and network meta-analysis covering efficacy, acceptability, and follow-up effects. Journal of Anxiety Disorders, 106, 102912. https://doi.org/10.1016/j.janxdis.2024.102912

Lokshina, Y., Sheynin, J., Vogt, G. S., & Liberzon, I. (2023). Fear Extinction Learning in Posttraumatic Stress Disorder. In M. R. Milad & S. D. Norrholm (Éds.), Fear Extinction : From Basic Neuroscience to Clinical Implications (p. 257-270). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/7854_2023_436

Longo, M. R., Schüür, F., Kammers, M. P. M., Tsakiris, M., & Haggard, P. (2008). What is embodiment? A psychometric approach. Cognition, 107(3), 978-998. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2007.12.004

Lyssenko, L., Schmahl, C., Bockhacker, L., Vonderlin, R., Bohus, M., & Kleindienst, N. (2018). Dissociation in Psychiatric Disorders : A Meta-Analysis of Studies Using the Dissociative Experiences Scale. The American Journal of Psychiatry, 175(1), 37-46. https://doi.org/10.1176/appi.ajp.2017.17010025

Manocchio, F., Enepekides, J., Nestor, S., Giacobbe, P., Rabin, J. S., Burke, M. J., Lanctôt, K. L., Goubran, M., Meng, Y., Lipsman, N., Hamani, C., & Davidson, B. (2025). Neuromodulation as a therapeutic approach for post-traumatic stress disorder : The evidence to date. Expert Review of Neurotherapeutics, 25(1), 101-120. https://doi.org/10.1080/14737175.2024.2442658

Montague, P. R., Dolan, R. J., Friston, K. J., & Dayan, P. (2012). Computational psychiatry. Trends in Cognitive Sciences, 16(1), 72-80. https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.11.018

Moore, J. W. (2016). What is the sense of agency and why does it matter? Frontiers in psychology, 7, 209433.

Ney, L. J., Schenker, M., & Lipp, O. V. (2022). Combining the trauma film and fear conditioning paradigms : A theoretical review and meta-analysis with relevance to PTSD. Behaviour research and therapy, 152, 104081.

Nicholson, A. A., Harricharan, S., Densmore, M., Neufeld, R. W. J., Ros, T., McKinnon, M. C., Frewen, P. A., Théberge, J., Jetly, R., Pedlar, D., & Lanius, R. A. (2020). Classifying heterogeneous presentations of PTSD via the default mode, central executive, and salience networks with machine learning. NeuroImage: Clinical, 27, 102262. https://doi.org/10.1016/j.nicl.2020.102262

Nicholson, A. A., McKinnon, M. C., Jetly, R., & Lanius, R. A. (2020). Uncovering the heterogeneity of posttraumatic stress disorder : Towards a personalized medicine approach for military members and Veterans. Journal of Military, Veteran and Family Health, 6(S1), 68-79. https://doi.org/10.3138/jmvfh.2019-0031

Nijdam, M. J., & Wittmann, L. (2022). Psychological and Social Theories of PTSD. In U. Schnyder & M. Cloitre (Éds.), Evidence Based Treatments for Trauma-Related Psychological Disorders (p. 41-63). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97802-0_3

O'Kane, S. H., Chancel, M., & Ehrsson, H. H. (2024). Hierarchical and dynamic relationships between body part ownership and full-body ownership. Cognition, 246, 105697. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2023.105697

Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness : The Edinburgh inventory. Neuropsychologia, 9(1), 97-113. https://doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4

Paetzold, R. L., & Rholes, W. S. (2021). The Link from Child Abuse to Dissociation : The Roles of Adult Disorganized Attachment, Self-Concept Clarity, and Reflective Functioning. Journal of Trauma & Dissociation, 22(5), 615-635. https://doi.org/10.1080/15299732.2020.1869654

Paquette, D., Laporte, L., Bigras, M., & Zoccolillo, M. (2004). Validation de la version française du CTQ et prévalence de l'histoire de maltraitance. Santé mentale au Québec, 29(1), 201-220. https://doi.org/10.7202/008831ar

Parrick, D. (2013). The effect of depressive symptoms, mental distress and empathy on embodiment of the rubber hand illusion. Theses : Honours. https://ro.ecu.edu.au/theses_hons/97

Paulus, M. P., Feinstein, J. S., & Khalsa, S. S. (2019). An Active Inference Approach to Interoceptive Psychopathology. Annual Review of Clinical Psychology, 15, 97-122. https://doi.org/10.1146/annurev-clinpsy-050718-095617

Peled, A., Pressman, A., Geva, A. B., & Modai, I. (2003). Somatosensory evoked potentials during a rubber-hand illusion in schizophrenia. Schizophrenia Research, 64(2-3), 157-163. https://doi.org/10.1016/S0920-9964(03)00057-4

Peled, A., Ritsner, M., Hirschmann, S., Geva, A. B., & Modai, I. (2000). Touch feel illusion in schizophrenic patients. Biological Psychiatry, 48(11), 1105-1108. https://doi.org/10.1016/S0006-3223(00)00947-1

Pivac, N., Vuic, B., Sagud, M., Nedic Erjavec, G., Nikolac Perkovic, M., Konjevod, M., Tudor, L., Svob Strac, D., Uzun, S., Kozumplik, O., Uzun, S., & Mimica, N. (2023). PTSD, Immune System, and Inflammation. Advances in Experimental Medicine and Biology, 1411, 225-262. https://doi.org/10.1007/978-981-19-7376-5_11

Postmes, L., Sno, H. N., Goedhart, S., van der Stel, J., Heering, H. D., & de Haan, L. (2014). Schizophrenia as a self-disorder due to perceptual incoherence.

Schizophrenia Research, 152(1), 41-50. https://doi.org/10.1016/j.schres.2013.07.027

Prajapati, S. K., Majumdar, S., Murari, S., MachhindraVadak, K., & Krishnamurthy, S. (2025). Neurochemical, Neurocircuitry, and Psychopathological Mechanisms of PTSD : Emerging Pharmacotherapies and Clinical Perspectives. ACS Chemical Neuroscience, 16(13), 2355-2370. https://doi.org/10.1021/acschemneuro.5c00335

Rabellino, D., Burin, D., Harricharan, S., Lloyd, C., Frewen, P. A., McKinnon, M. C., & Lanius, R. A. (2018). Altered Sense of Body Ownership and Agency in Posttraumatic Stress Disorder and Its Dissociative Subtype : A Rubber Hand Illusion Study. Frontiers in Human Neuroscience, 12, 163. https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00163

Rabellino, D., Harricharan, S., Frewen, P. A., Burin, D., McKinnon, M. C., & Lanius, R. A. (2016). « I can't tell whether it's my hand » : A pilot study of the neurophenomenology of body representation during the rubber hand illusion in trauma-related disorders. European Journal of Psychotraumatology, 7, 32918. https://doi.org/10.3402/ejpt.v7.32918

Riemer, M., Trojan, J., Beauchamp, M., & Fuchs, X. (2019). The rubber hand universe : On the impact of methodological differences in the rubber hand illusion. Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 104, 268-280. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2019.07.008

Rivest-Beauregard, M., Brunet, A., Gaston, L., Al Joboory, S., Trousselard, M., Simson, J.-P., Amara, P., Sourdril, N., Gandubert, C., Hingray, C., Dallel, S., Guinard, J., Saumier, D., Richa, S., & El-Hage, W. (2022). The clinician-administered PTSD Scale for DSM-5 (CAPS-5) structured interview for PTSD : A French language validation study. Psychological Assessment, 34(3), e26-e31. https://doi.org/10.1037/pas0001099

Rolls, E. T., Deco, G., Huang, C.-C., & Feng, J. (2023). Prefrontal and somatosensory-motor cortex effective connectivity in humans. Cerebral Cortex, 33(8), 4939-4963. https://doi.org/10.1093/cercor/bhac391

Rosendahl, J., Kisyova, H., Gawlytta, R., & Scherag, A. (2019). Comparative validation of three screening instruments for posttraumatic stress disorder after intensive care. Journal of Critical Care, 53, 149-154. https://doi.org/10.1016/j.jcrc.2019.06.016

Rowe, J. B., Hughes, L., & Nimmo-Smith, I. (2010). Action selection : A race model for selected and non-selected actions distinguishes the contribution of premotor and prefrontal areas. NeuroImage, 51(2), 888-896. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.02.045

Samad, M., Chung, A. J., & Shams, L. (2015). Perception of body ownership is driven by Bayesian sensory inference. PloS One, 10(2), e0117178. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0117178

Stephan, K. E., & Mathys, C. (2014). Computational approaches to psychiatry. Current Opinion in Neurobiology, 25, 85-92. https://doi.org/10.1016/j.conb.2013.12.007

Tosi, G., Kalckert, A., Sivasubramanian, A. K., & Romano, D. (2024). The rubber hand illusion questionnaire : An exploratory graph analysis of ownership,

referral of touch, and control statements. Attention, Perception, & Psychophysics, 86(8), 2866-2876. https://doi.org/10.3758/s13414-024-02964-w

Tull, M. T., Vidaña, A. G., & Betts, J. E. (2020). Chapter 10—Emotion regulation difficulties in PTSD. In M. T. Tull & N. A. Kimbrel (Éds.), Emotion in Posttraumatic Stress Disorder (p. 295-310). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816022-0.00010-7

Utz, K. S., Dimova, V., Oppenländer, K., & Kerkhoff, G. (2010). Electrified minds : Transcranial direct current stimulation (tDCS) and galvanic vestibular stimulation (GVS) as methods of non-invasive brain stimulation in neuropsychology--a review of current data and future implications. Neuropsychologia, 48(10), 2789-2810. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.06.002

Van't Wout, M., Longo, S. M., Reddy, M. K., Philip, N. S., Bowker, M. T., & Greenberg, B. D. (2017). Transcranial direct current stimulation may modulate extinction memory in posttraumatic stress disorder. Brain and Behavior, 7(5), e00681. https://doi.org/10.1002/brb3.681

Wang, J., Yao, X., Ji, Y., & Li, H. (2024). Cognitive potency and safety of tDCS treatment for major depressive disorder : A systematic review and meta-analysis. Frontiers in Human Neuroscience, 18. https://doi.org/10.3389/fnhum.2024.1458295

Weathers, F., Litz, B., Herman, D., Huska, J. A., & Keane, T. (1993). The PTSD Checklist (PCL) : Reliability, validity, and diagnostic utility. Paper Presented at the Annual Convention of the International Society for Traumatic Stress Studies.

Weathers, F. W., Blake, D. D., Schnurr, P. P., Kaloupek, D. G., Marx, B. P., & Keane, T. M. (2013). The clinician-administered PTSD scale for DSM-5 (CAPS-5). Interview available from the National Center for PTSD at www. ptsd. va. gov.

Weathers, F. W., Litz, B. T., Keane, T. M., Palmieri, P. A., Marx, B. P., & Schnurr, P. P. (2013). The ptsd checklist for dsm-5 (pcl-5). https://www.london-spring.org/post-traumatic-stress-disorder-journal-pdf/

Weathers, F. W., Ruscio, A. M., & Keane, T. M. (1999). Psychometric properties of nine scoring rules for the Clinician-Administered Posttraumatic Stress Disorder Scale. Psychological assessment, 11(2), 124. https://doi.org/10.1037/1040-3590.11.2.124

Xie, L., Hu, P., Guo, Z., Chen, M., Wang, X., Du, X., Li, Y., Chen, B., Zhang, J., Zhao, W., & Liu, S. (2024). Immediate and long-term efficacy of transcranial direct current stimulation (tCDS) in obsessive-compulsive disorder, posttraumatic stress disorder and anxiety disorders : A systematic review and meta-analysis. Translational Psychiatry, 14(1), 343. https://doi.org/10.1038/s41398-024-03053-0

Yamada, Y., & Sumiyoshi, T. (2021). Neurobiological Mechanisms of Transcranial Direct Current Stimulation for Psychiatric Disorders; Neurophysiological, Chemical, and Anatomical Considerations. Frontiers in Human Neuroscience, 15. https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.631838

Yang, X., Ma, L., Fan, C., Wang, H., Zhang, M., Du, H., Zhou, T., & Li, X. (2025). Efficacy and acceptability of brain stimulation for anxiety disorders, OCD, and PTSD : A systematic review and network meta-analysis of randomized controlled trials. Journal of Affective Disorders, 370, 62-75. https://doi.org/10.1016/j.jad.2024.10.071

Zheng, E. Z., Wong, N. M. L., Yang, A. S. Y., & Lee, T. M. C. (2024). Evaluating the effects of tDCS on depressive and anxiety symptoms from a transdiagnostic perspective : A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. Translational Psychiatry, 14(1), 1-15. https://doi.org/10.1038/s41398-024-03003-w

PARTIE 4 :

L'ÉCHELLE D'IMMOBILITÉ TONIQUE

Validation française de l'échelle d'immobilité tonique chez des patients souffrant d'un trouble de stress post-traumatique

French validation of the tonic immobility scale in patients with post-traumatic stress disorder

Andrew Laurin [a], Jean-Benoît Hardouin [b], Morgane Pere [c], Maëlle Fauvre [d], Hugo Bottemanne [e], Raphaëlle Richieri [f], Alain Brunet [g], Maud Rötharmel [h], Wissam El-Hage [i],Samuel Bulteau [j], Thibault Deschamps [k], Anne Sauvaget [a]

a) Université de Nantes, CHU Nantes, Mouvement - Interactions - Performance, MIP, UR 4334, F-44000, Nantes, France
b) Université de Nantes, Université de Tours, INSERM, SPHÈRE U1246, F-44000, Nantes, France
c) CHU Nantes, Département de Biostatistique F-44000, Nantes, France
d) Université de Nantes, CHU Nantes, F-44000, Nantes, France
e) MOOD Center, Hôpital de Bicêtre, Département de psychiatrie, Université Paris-Saclay, INSERM, AP-HP, Paris, France
f) Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, Marseille, France
g) Université McGill et Centre de recherche de l'Institut Douglas du CIUSSS-ODIM, 6875 Bd LaSalle, Verdun, QC H4H 1R3, Canada
h) Département universitaire de psychiatrie, Centre d'excellence thérapeutique, Institut de psychiatrie - Centre hospitalier du Rouvray, F-76300, Sotteville-lès-Rouen, France
i) UMR 1253, iBraiN, Université de Tours, CHRU de Tours, INSERM, Tours, France
j) Nantes Université, CHU Nantes, INSERM, MethodS in Patients-centered outcomes and HEalth Research, SPHERE F-44000 Nantes, France
k) Nantes Université, Movement - Interactions - Performance, MIP, UR 4334, F-44000, Nantes, France

Mots clés : Immobilité tonique ; Syndrome de stress post-traumatique ; Échelle de cotation ; Validation psychométrique.

RÉSUMÉ

Introduction : Chez les humains, l'immobilité tonique (IT) se caractérise par une inhibition musculaire, une hypertonie et une analgésie qui peuvent survenir lors d'un

événement traumatique. L'IT est associée à un risque accru de trouble de stress post-traumatique (TSPT) sévère et résistant aux traitements. À ce jour, il n'existe pas d'échelle française validée pour évaluer l'IT.
Matériel et méthode : Une fois traduite en français, nous avons étudié la validité de face (étude qualitative) et les propriétés psychométriques de la version française de l'échelle d'immobilité tonique - 10 items (FR-TIS) chez des adultes souffrant d'un TSPT.
Résultats : Concernant la validité de face, six participants ont confirmé que la FR-TIS était simple, claire et compréhensible, mais elle présentait certaines limites concernant la qualité de l'évaluation de l'IT en fonction de l'ancienneté du traumatisme, de l'intensité de la dissociation péritraumatique, des comportements d'évitement actuel, et selon le type et le contexte de survenu du traumatisme. Pour les propriétés psychométriques, 120 patients ont complété une version informatisée de la FR-TIS. La FR-TIS a montré de bonnes propriétés psychométriques dans une forme à trois dimensions incluant 8 items (Root Mean Square Error of Approximation (RMSEA) = 0,056) dont 4 items pour l'IT (α de Cronbach = 0,76), 2 items pour la peur (α de Cronbach = 0,63), 2 items pour la dissociation (α de Cronbach = 0,68).
Conclusion : La FR-TIS est un outil potentiellement utile et facile à utiliser dans la pratique clinique pour aider à améliorer le dépistage et l'évaluation de l'IT.

1. Introduction

Dans « *The Expression of Emotions in Man and Animals* » (1872), Darwin a soutenu la thèse selon laquelle l'expressions des émotions chez l'Homme pouvaient ressembler à celles des animaux et cette expression émotionnelle s'était adaptée au cours de l'évolution (Darwin, 1929). Les émotions étaient alors considérées comme un avantage phylogénétique produisant des mécanismes d'action bénéfiques pour l'organisme (Rivers, 1922). Bien étudiée chez les animaux depuis le début du XX^{ème} siècle, la cascade de défense en réponse à une menace comprend plusieurs comportements dont « l'éveil » (« *arousal* »), le « gel » (« *freeze*), le « combat » « *fight* ») ou la « fuite » (« *flight* ») (Kozlowskaet al., 2015). Face à un danger imminent et inéluctable, la réponse finale de la cascade de défense est l'immobilité tonique (IT) (Castiglioni et al., 2009 ; Gentle et al., 1989). Chez la plupart des espèces, l'IT a pour but d'imiter la mort et la rigidité cadavérique, également appelée « *playing dead* ». Ces réponses de défense chez les animaux sont médiées par des circuits neuronaux impliquant principalement l'amygdale, l'hypothalamus, la matière grise périaqueducale latérale et ventrolatérale, la moelle épinière et le système nerveux autonome (Klemm, 1971 ; Kozlowskaet al., 2015 ; Monassi et al., 1997 ; Ramos et al., 1999). En outre, l'analgésie opioïde soutient les réponses de défense « *passives* » caractérisées par une mobilité réduite (le gel ou l'IT) (Hagenaars et al., 2014 ; Roelofs, 2017).

Chez l'homme, l'IT est une réponse défensive et involontaire à des événements menaçant la vie qui se caractérise par une conscience préservée avec une posture de type catatonique associant une inhibition motrice, une rigidité musculaire, un

mutisme, une analgésie, une sensation de froid, des tremblements de type Parkinson et un regard fixe (Kozlowska et al., 2015). Cependant, chez l'homme, l'IT présente certaines caractéristiques spécifiques telles qu'une association possible avec des symptômes de dépersonnalisation et de déréalisation (Abrams et al., 2009) ; l'IT est associée à un sentiment subjectif de « *piégeage* » (Bovin et al., 2008). En outre, les individus peuvent activer des symptômes de l'IT même lorsque l'événement traumatique est passé via des représentations mentales ou des rappels à distance du souvenir traumatique. La présence et l'intensité des réactions de l'IT après l'exposition à un traumatisme peuvent être évaluées à l'aide d'outils tels que la S*cale for Tonic Immobility Occurring Post-Trauma* (STOP), une échelle d'auto-évaluation comportant 41 items répartis sur 15 domaines et qui présente un excellent coefficient de cohérence interne ($\alpha = 0,96$) (Lloyd et al., 2019).

En 1979, les premiers cas décrits d'IT humaine ont été rapportés chez des femmes victimes d'un viol, dénommé à l'époque « *la paralysie induite par le viol* » (Suarez et Gallup, 1979). C'est ainsi que Galliano et al. (1993) ont mené la première étude systématique concernant l'IT chez les victimes de viol (Fusé et al., 2007 ; Gallianoet al., 1993 ; Heidt et al., 2005). Initialement mis en évidence chez les femmes ayant subi un traumatisme sexuel, on sait aujourd'hui que l'IT peut survenir dans d'autres populations, comme les hommes (Bados et al., 2008), les étudiants (Bados et al., 2008 ; Portugalet al., 2012) ou les policiers (Maia et al., 2015). L'IT est plus fréquente dans les cas de violence interpersonnelle, mais l'IT peut également se produire dans d'autres types d'événements traumatiques (Coimbra et al., 2023 ; Kalaf et al., 2017). Plusieurs facteurs de risque sont associés à l'IT chez les humains, tels que le type de danger ressentie lors de l'évènement traumatique – l'IT un mécanisme réflexe et défensif ultime (Volchan et al., 2017) ; le type de traumatisme – l'IT est surreprésenté dans les abus sexuels dans l'enfance et les violences sexuelles chez les adultes (Bados et al., 2008 ; Kalaf et al., 2017) ; les caractéristiques individuelles – l'IT est plus sévère chez les femmes (Coimbra et al., 2023 ; Kalafet al., 2015). Au-delà de sa fonction protectrice, l'IT est associée à un risque accru de trouble de stress post-traumatique (TSPT) (Bovin et al., 2008 ; Galliano et al., 1993 ; Heidt et al., 2005 ; Humphreys et al., 2010) d'où l'important d'avoir des outils pour évaluer l'IT. En effet, l'IT modérée à extrême est surreprésentée dans le TSPT, affectant entre 7,6 % et 17,7 % des patients souffrant d'un TSPT, contre 0,6 % à 6,3 % des personnes sans traumatisme ou avec un traumatisme mais sans TSPT (Hagenaars, 2016).

Le TSPT est un trouble mental fréquent (Koenen et al., 2017), coûteux (von der Warthet al., 2020) et 80% des TSPT sont associés à des comorbidités psychiatriques ou physiques (Kessler et al., 1995, 2012 ; Pivac et al., 2023). Par conséquent, les facteurs de risque du TSPT sont étudiés depuis des décennies afin d'identifier le plus tôt possible les personnes à risque de développer un TSPT après un exposition traumatique et ainsi proposer des interventions précoces (Brewin et al., 2000 ; Ozer et al., 2003 ; Qi et al., 2016). Il est important de noter que l'IT est associé à des TSPT plus graves (Coimbra et al., 2023 ; deMello et al., 2023 ; Fiszman et al., 2008 ; Lima et al., 2010 ; Rocha-Rego et al., 2009 ; Volchan et al., 2017) et des TSPT plus résistants aux traitements antidépresseurs (Fiszman et al., 2008 ; Lima et al., 2010). En outre, l'IT peut exacerber le développement d'un syndrome dépressif sévère, en particulier

dans les cas d'agression sexuelle. En effet, les victimes peuvent se sentir honteuses ou coupables de ne pas avoir pu résister à leur agresseur et elles peuvent se demander si elles ont consenti par « *non-opposition* » (McCaulet et al., 1990 ; Möller et al., 2017 ; Russo, 2017).

La dissociation peut être définie comme « *la perte partielle ou complète de l'intégration normale entre les souvenirs, la conscience, l'identité, les sensations immédiates et le contrôle des mouvements corporels* » (Organisation mondiale de la santé, 2018). La dissociation péritraumatique a longtemps été identifiée comme un facteur de risque de développer un TSPT ultérieur (Brewin et al., 2000 ; Ozer et al., 2003). En théorie, la dissociation inclut donc le concept d'IT. Cependant, le *Peritraumatic Dissociative Experiences Questionnaire* (PDEQ) (Birmes et al., 2005; Marmar et al., 2004) et le *Peritraumatic Distress Inventory* (PDI) (Brunet et al., 2001 ; Jehel et al., 2005) ne contiennent aucun item évoquant clairement l'IT. L'échelle d'immobilité tonique (*Tonic Immobility Scale*, TIS) à 10 items est le premier instrument d'auto-évaluation validé en anglais avec une bonne cohérence interne (α = 0,86) pour évaluer l'IT chez les femmes victimes d'abus ou d'agressions sexuelles (Forsyth et al., 2000). La TIS contient 10 items dans laquelle la personne évalue dans quelle mesure elle s'est figée ou s'est sentie paralysée, a été incapable de bouger même sans contrainte physique, a tremblé, a été incapable de secouer, s'est sentie engourdie ou n'a pas ressenti de douleur, a eu froid, a ressenti des sentiments de peur/panique, a craint pour sa vie, s'est sentie détachée d'elle-même, ou s'est sentie détachée de ce qui se passait autour d'elle au cours du traumatisme. Chez les survivantes d'agressions sexuelle, la TIS a montré d'excellentes propriétés psychométriques avec deux dimensions que sont l'IT (α = 0,94) et la peur (α = 0,94) (Fusé et al.,2007). D'autres auteurs ont identifié trois dimensions à la TIS (IT, peur et détachement/dissociation) comme une étude menée auprès de 131 adolescents ou adultes victimes de viol (Covers et al., 2022), et une autre étude réalisée dans la population générale israélienne (Dokkedahl et al., 2024). Cette approche à trois facteurs a inspiré d'autres échelles d'auto-évaluation, telles que le *Tonic Immobility Questionnaire* (21 items), qui présente un bon coefficient de cohérence interne (α = 0,89), y compris pour le sous-score IT (α = 0,89) (Abrams et al., 2009). Progressivement, des versions plus courtes et abrégées de la TIS en 10 items ont été validées, qui excluaient les items de peur dont la cohérence interne était très faible en dehors des traumatismes sexuels (α = 0,45) (Bados et Peró, 2015). Une autre étude a dû exclure systématiquement les items « *freeze paralyzed* » et « *detachment from surround* » dans les différentes versions de la TIS étudiées (Reichenheim et al., 2014) et une dernière étude a exclu les items de dissociation/détachement pour distinguer l'IT de la dissociation péritraumatique (Coimbra et al., 2023).

Compte tenu de l'importance de l'IT pour le pronostic des personnes exposées à un traumatisme, l'objectif principal de notre étude était d'analyser la validité d'une version française de la TIS en 10 items chez les patients souffrant d'un TSPT, indépendamment du sexe de la victime et du type d'événement traumatique. Pour atteindre notre objectif principal, nous avons d'abord traduit en français la TIS en 10 items (FR-TIS) avant d'en évaluer la validité de face et les propriétés psychométriques. L'étude de la validité de face visait à évaluer les sentiments subjectifs des patients

après avoir rempli la FR-TIS en utilisant une approche qualitative : comment les patients ont-ils jugé la pertinence, la faisabilité et la compréhensibilité de l'échelle traduite ? Les attitudes des patients à l'égard de l'échelle traduite étaient-elles positives ou négatives ? Dans quelle mesure les réponses étaient-elles sincères ? L'expérience de l'examinateur n'a pas été prise en compte car la FR-TIS est un questionnaire auto-administré. Dans un second temps, nous avons évalué les propriétés psychométriques et la cohérence interne de la FR-TIS dans un large échantillon de patients civils souffrant d'un TSPT.

2. Matériel et méthode

2.1. Processus de traduction

Pour élaborer la traduction, nous nous sommes inspirés des lignes directrices mondiales pour la traduction interculturelle d'auto-questionnaires (Beatonet al., 2000). La version anglaise de la TIS en 10 items a été traduite en français par deux chercheurs dans le domaine de la motricité et des neurosciences. Les traducteurs étaient bilingues, l'un de langue maternelle française et l'autre de langue maternelle anglaise. Pour le premier traducteur, qui était aveugle, la tâche consistait à traduire la version anglaise de la TIS-10 items en français sans connaître le nom de l'échelle, ses objectifs d'évaluation ou son mode d'administration. Le second traducteur a été informé de tous ces éléments. Une fois la traduction terminée, une réunion de consultation a été organisée entre les deux traducteurs et un expert du TSPT et de l'IT afin d'harmoniser la traduction française et de s'assurer de sa pertinence clinique. La traduction française harmonisée a ensuite été retraduite en anglais par un chercheur bilingue de langue maternelle anglaise, totalement aveugle à la version originale. Cette version retraduite a ensuite été comparée à la version originale de la TIS pour s'assurer qu'il n'y avait pas d'importante dérive de traduction et que la FR-TIS restait pertinente par rapport aux items originaux. Une réunion d'harmonisation finale, impliquant tous les traducteurs, un médecin et un autre chercheur dans le domaine des neurosciences et de la motricité, a été organisée pour parvenir à des formulations satisfaisantes des items, valider le processus de traduction et confirmer la pertinence clinique du TIS. Enfin, une première version papier et électronique de la FR-TIS a été créée.

2.2. Conception de l'étude

Notre étude a été réalisée entre juillet 2021 et septembre 2023. Pour l'analyse de la validité apparente, nous avons inclus des patients civils hommes et femmes âgés d'au moins 18 ans et suivis en consultation de victimologie et de psychotraumatologie du CHU de Nantes (France) avec un diagnostic principal de TSPT. L'étude a été proposée aux patients lors des consultations par leur psychiatre référent, qui était au courant de l'étude. Si un patient était intéressé, il pouvait contacter les investigateurs par téléphone ou par courriel afin de convenir d'un rendez-vous en vue de son inclusion. Tous les patients inclus ont rempli les auto-questionnaires suivants, toujours dans le même ordre, en présence d'un évaluateur : les données sociodémographiques, une liste des événements traumatiques, une échelle d'auto-évaluation du trouble de stress post-

traumatique selon les critères diagnostics du DSM-5 (*Post-traumatic Stress Disorder Checklist for DSM-5*, PCL-5) (Ashbaugh et al., 2016 ; Weathers et al.,2013) et enfin la FR-TIS. Dans un premier temps, l'évaluateur qui se trouvait avec le patient a chronométré le remplissage de la FR-TIS (en secondes). Dans un deuxième temps, l'évaluateur a mené un entretien dans le cadre d'une approche qualitative afin d'évaluer la validité de face (ou apparente) de la FR-TIS. Au moyen d'un entretien semi-structuré, un évaluateur formé (un médecin universitaire spécialisé dans le TSPT) a demandé à chaque patient son impression générale sur l'échelle traduite avant d'analyser chaque item individuellement. Pour chaque item de la FR-TIS, il a été demandé : (i) le niveau de compréhension de l'item, (ii) une demande de reformulation de l'item - dans les propres mots du patient - pour s'assurer que le patient avait correctement identifié le symptôme évalué dans l'item en question, (iii) et si la réponse à l'item était une réponse validée a posteriori par le participant et non due au hasard généré par un malentendu ou une imprécision dans la formulation de l'item. Si un problème était identifié dans l'une de ces situations, l'évaluateur demandait au patient de proposer une autre formulation de l'item problématique afin de lever toute ambiguïté. Chaque entretien a été enregistré de manière anonyme avant d'être retranscrit pour des analyses. Concernant les propriétés psychométriques, la FR-TIS a été informatisé et publié sur les réseaux sociaux avec le soutien de l'Université, du Centre Hospitalier de Nantes et des associations de victimes afin d'obtenir un maximum de participants provenant d'horizons différents.

2.3. Sélection des patients et recueil des données

Les critères d'inclusion étaient les suivants : patients ambulatoires hommes et femmes âgés d'au moins 18 ans présentant un TSPT confirmé par un score total ≥ 33 à la *PTSD Checklist for DSM-5* (PCL-5) (Weathers et al., 2013) en considérant que le score seuil ≥ 33 a été déterminé à partir de plusieurs études utilisant les versions anglaise et allemande de la PCL-5 (Bovin et al., 2016 ; Dickstein et al., 2014 ; Krü-ger-Gottschalk et al., 2017 ; Rosendahl et al., 2019). La PCL-5 est un questionnaire auto-administré comprenant 20 items évaluant l'intensité des symptômes du TSPT au cours du mois écoulé, c'est une échelle traduite et validée en français avec un excellent coefficient de cohérence interne chez 262 étudiants français de premier cycle (α = 0,94), un coefficient de cohérence interne proche de la version anglaise (α = 0,95) (Ashbaugh et al., 2016). Dans notre étude comprenant 120 patients souffrant d'un TSPT, nous avons retrouvé un coefficient de cohérence interne acceptable (α = 0,77). Concernant les critères d'exclusion, ils étaient les suivants : toute personne sous protection juridique, tutelle ou curatelle ; les personnes ne parlant pas français ; les personnes souffrant de troubles cognitifs ou de troubles mentaux sévères à l'exception du TSPT (ex. manie, dépression, trouble délirant) ; toute situation rendant impossible l'obtention du consentement ou la réalisation de la présente recherche.

Pour chaque patient, nous avons recueilli les données suivantes : les données sociodémographiques (sexe, âge, état civil, enfants et statut professionnel), les données psychométriques (scores de la PCL-5 et de la FR-TIS), la durée des symptômes du TSPT en mois, les antécédents d'exposition à des événements

traumatiques au cours de la vie à l'aide d'une liste des événements traumatiques, l'événement index (l'événement traumatique le plus grave et le plus douloureux), la date de l'exposition à l'événement traumatique index, le temps de remplissage de la FR-TIS en secondes.

2.4. Analyse statistique

L'analyse de la validité de face de la FR-TIS a été effectuée après une relecture des entretiens transcrits par deux évaluateurs différents (M.F. et A.L.). Pour l'analyse de l'impression globale de la FR-TIS, un premier codage descriptif avec des verbatims a été effectué. L'analyse des thèmes et des verbatims a permis d'étudier la validité apparente. Nous avons ensuite analysé les propriétés psychométriques de la FR-TIS dans une première approche unidimensionnelle puis tridimensionnel. Pour chaque structure, nous avons principalement analysé :

- La fiabilité des scores à l'aide du coefficient alpha de Cronbach (> 0,7 est attendu) ;
- L'absence de divergences dans les réponses à l'aide des coefficients de scalabilité H de Loevinger (> 0,3 est attendu);
- La validité convergente (*Convergent Validity*, CV) en utilisant le taux d'items dont le coefficient de corrélation entre les réponses à l'item et le score de la dimension contenant les items est supérieur à 0,4 ;
- La validité divergente (*Divergent Validity,* DV) en utilisant le taux d'items plus corrélés à une autre dimension que celle contenant cet item ;
- L'analyse factorielle confirmatoire (*Confirmatory Factor Analysis,* CFA) pour valider la structure du questionnaire (on s'attend à ce que l'erreur quadratique moyenne d'approximation (*Root Mean Square Error of Approximation*, RMSEA) soit < 0,08 avec un indice comparatif d'adéquation (*Comparative Fit Index*, CFI) >0,9).

L'analyse statistique a été réalisée sur le site web PRO-online (https://pro-online.net) à l'aide du logiciel Stata 18 (StataCorp, College Sta-tion, Texas, USA).

2.5. Éthique

Pour la validité apparente, les patients ont signé un formulaire de consentement écrit. Pour les questionnaires informatisés, les patients ont accepté ou refusé de poursuivre l'étude après avoir lu le formulaire de consentement en ligne. Cette méthode de consentement est considérée comme acceptable pour les études en ligne (Brunet et al., 2010). Les données étaient strictement anonymes. Notre recherche a été menée conformément à la Déclaration d'Helsinki, et nous avons obtenu l'approbation d'un comité d'éthique local (Comité d'Éthique pour la Recherche Non-Interventionnelle, CERNI, n° IRB : IOR0011023).

3. Résultats

3.1. Validité de face

Nous avons interrogé six patients pour l'étude qualitative de la validité de face. L'échantillon comprenait un homme et cinq femmes âgés de 18 à 35 ans (médiane : 30,5). Le niveau d'éducation variait de 6 à 17 ans (médiane : 11). Les patients avaient un score total à la PCL-5 allant de 42 à 57 (médiane : 48), une ancienneté du TSPT allant de 1,5 à 24 mois (moyenne : 8,5 ± 9,6 ; médiane : 3,5). Cinq participants ont déclaré un viol comme événement index, et une patiente a déclaré un accident vasculaire cérébral comme événement index. L'ancienneté de l'événement index variait de 2 à 288 mois (médiane : 69). Les scores totaux de la FR-TIS allaient de 26 à 52 (médiane : 31). Le temps nécessaire pour compléter le format papier de la FR-TIS allait de 65 à 133 secondes (médiane : 98). Les impressions générales des patients concernant la FR-TIS étaient toujours positives. Les six patients ont trouvé que la FR-TIS était simple, clair et compréhensible, d'une longueur appropriée, et ils ont apprécié de pouvoir évaluer chaque symptôme à l'aide d'une échelle visuelle numérique, ce qui leur a permis d'exprimer au mieux la présence et l'intensité des symptômes évalués. En outre, la pertinence et la précision des items ont été soulignées. En ce qui concerne l'analyse item par item, tous les patients ont clairement compris chacun des items qui ont été décrits.

Malgré ces résultats positifs sur la validité apparente, les patients ont pu mettre en évidence quelques limitations mineures concernant la FR-TIS liées à des difficultés à se souvenir en détail de leur événement traumatique en raison des facteurs suivants : l'ancienneté de l'événement (biais de mémoire), l'intensité de la dissociation péritraumatique (notamment l'amnésie dissociative), le contexte de l'événement (par exemple, la consommation de substances toxiques ou la soumission chimique) et l'intensité des comportements d'évitement associés au TSPT. En outre, un biais d'évaluation potentiel a été constaté en fonction du type traumatisme (par exemple, un accident vasculaire cérébral au cours duquel la patiente n'a pas été en mesure de distinguer si elle était immobile en raison de l'IT ou de l'accident vasculaire cérébral). Les avantages et inconvénients du FR-TIS sont résumés dans le tableau 1.

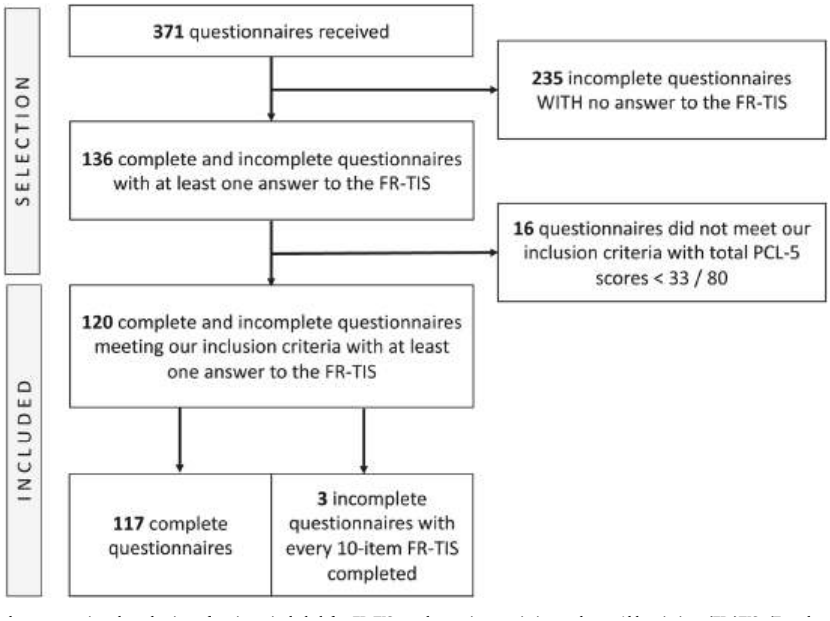
Tableau 1 : Avantages et limites de la FR-TIS

Advantages	Limitations
Short; Clear, precise and comprehensible; Easy to perform; Clinically relevant; Numerical evaluation scale appreciated.	1. Retrospective evaluation with limitations in event recall depending on several factors: - The age of the event (mnesic bias); - Intensity of dissociation during the trauma (dissociative amnesia); - The context of the event (e.g. presence of toxic substances or chemical submission); - Avoidance behaviors related to current post-traumatic stress disorder. 2. Assessment bias according to type of event (e.g., stroke).

3.2. Propriétés psychométriques

Nous avons reçu 371 questionnaires informatisés, mais 251 ont été exclus : 235 questionnaires étaient incomplets avec aucun item rempli sur la FR-TIS empêchant toute analyse de validation, et 16 questionnaires ne répondaient pas aux critères d'inclusion avec des scores à la PCL-5 inférieurs au score seuil. Nous avons donc basé nos analyses sur 120 questionnaires, correspondant à un taux de rétention de 32 % (120/371), incluant 117 questionnaires complets et 3 questionnaires incomplets (avec des données sociodémographiques manquantes mais toutes les réponses de la FR-TIS ont été documentées) (Figure 1 : Organigramme).

Figure 1 : Organigramme concernant la sélection des patients inclus pour l'analyse des propriétés psychométriques de la FR-TIS.



Abréviation : (FR-)TIS : Tonic Immobility Scale (version française), PCL-5 : Post Traumatic Stress Disorder Checklist for DSM-5.

Tableau 2 : Caractéristiques sociodémographiques et cliniques des patients inclus dans l'analyse de la validité psychométrique de la FR-TIS (N =120).

$N = 120$		
Sociodemographic data		
Women		104 (86.7 %)
Men		13 (11,1 %)
Age (in years)		33.5 ± 12.7
Work status:		
	Students	30 (25.6 %)
	Workers	57 (47.5 %)
	Unemployed	28 (23.3 %)
	Retired	2 (1.7 %)
Marital status:		
	Single	51 (43.6 %)
	Divorced	12 (10.3 %)
	In couple	31 (26.5 %)
	Married	22 (18.8 %)
	Widowed	1 (0.9 %)
With children		39 (33.3 %)
Missing data		3 (2.5 %)
Traumatic events data		
Total number of traumas over a lifetime		9.9 ± 9.5
Index traumatic events		
1. Natural disasters		3 (2.5 %)
2. Fire or explosion		1 (0.8 %)
3. Transport accident		1 (0.8 %)
4. Severe accident at work, at home or during leisure activities		3 (2.5 %)
5. Physical aggression		13 (10.8 %)
6. Armed attack		1 (0.8 %)
7. Sexual assault after age 18		43 (35.8 %)
8. Sexual assault before age 18		10 (8.3 %)
9.Life-threatening illness or injury		6 (5 %)
10. Intense human suffering		6 (5 %)
11. Violent death		6 (5 %)
12. Sudden death of a loved one		11 (9.2 %)
13. Serious injury or death caused by you		2 (1.7 %)
14. Severe childhood neglect		14 (11,7 %)
Index event with interpersonal violence		83 (69.2 %)
Date of index event (in months)		111.7 ± 127.8
PCL-5 psychometric data		
PCL-5 total score (/80)		50.2 ± 10.2
Sub-score intrusive symptoms (/20)		12.6 ± 3.5
Sub-score avoidance behaviors (/8)		5.5 ± 2
Sub-score negative cognition and mood (/28)		18.1 ± 4.8
Sub-score hyperarousal symptoms (/24)		14 ± 4
Duration of illness (in months)		75.8 ± 105.6
FR-TIS psychometric data		
FR-TIS 10-items total score (/60)		39.2 ± 10.5
Sub-score of tonic immobility (/36)		22.2 ± 7.4
Sub-score of fear (/12)		8.2 ± 3.4
Sub-score of dissociation (/12)		8.7 ± 3.3
Duration of occurrence (in seconds)		102.4 ± 63.3

Les données sont des effectifs (%) et des moyennes ± écarts types. Les sous-scores de la FR-TIS étaient : l'IT correspond aux items 1 à 6, la peur correspond aux items 7 et 8, la dissociation correspond aux items 9 et 10. Abréviations : PCL-5 : PTSD Checklist version DSM-5, FR-TIS : version française de l'échelle d'immobilité tonique.

Les données sociodémographiques et cliniques de l'échantillon sont résumées dans le tableau 2. Nous avons d'abord analysé les propriétés psychométriques de la FR-TIS de manière unidimensionnelle. Les résultats ont montré un coefficient de cohérence interne acceptable (α = 0,72) mais un faible taux de validité convergente à 30 % (3 items sur 10), des scores insuffisants concernant le RMSEA (0,142, IC 90 % : 0,114 ; 0,17) et des scores insuffisants concernant l'indice comparatif d'adéquation (CFI = 0,68) (Tableau 3). Nous avons donc exploré les propriétés psychométriques de la FR-TIS dans trois dimensions : l'IT (items 1 à 6), la peur (items 7 et 8) et la dissociation (items 9 et 10). Une cohérence interne satisfaisante a été observée dans les différentes dimensions, allant de 0,63 à 0,68, et toutes les autres mesures se sont améliorées (Tableau 3). Cependant, deux items ont été considérés comme problématiques et ont diminué la qualité psychométrique de la FR-TIS. Il s'agissait des items 3 (sensation de tremblement) et 6 (sensation de froid), qui présentaient tous deux une faible validité convergente (< 0,40), une forte validité divergente (> 0,40) et une faible charge factorielle avec l'analyse factorielle confirmatoire (< 0,40). Dans ce contexte, nous avons analysé les propriétés psychométriques de la FR-TIS en 8 items après avoir exclu les items 3 et 6. Les résultats ont montré une meilleure performance

psychométrique de la FR-TIS en 8 items repartis en trois dimensions. En effet, les coefficients de cohérence interne des trois dimensions étaient de 0,63 (pour les items de peur), 0,68 (pour les items de dissociation) et 0,76 (pour les items de TI) - avec une cohérence interne globalement acceptable (α = 0,71) - et les taux de validité convergente et divergente étaient de 100 % associés à des bons scores au RMSEA (0,056, IC 90 % : 0 ; 0,107) et à la CFI (0,973) (Tableau 3). Considérant que le temps nécessaire pour remplir le TIS à 10 items était d'environ 100 secondes, que ce soit sur papier ou sur ordinateur, nous avons estimé que le temps nécessaire pour remplir la FR-TIS en 8 items serait d'environ 80 secondes.

Tableau 3 : Validité psychométrique de la FR-TIS avec une analyse unidimensionnelle, puis tridimensionnelle et enfin tridimensionnelle modifiée dans laquelle les items 3 et 6 pour la sensation de tremblement et de froid, respectivement, ont été exclus

	N	α	HJ	CV	DV	RMSEA	CFI
FR-TIS 1-dimension	120	0.72	0.15	30 %	–	0.142	0.680
FR-TIS 3-dimensions							
Dimension #1: IT	120	0.68	0.15	70 %	80 %	0.090	0.883
Dimension #2: Fear	120	0.63	0.54				
Dimension #3: Dissociation	120	0.68	0.53				
Modified FR-TIS 3-dimensions							
Dimension #1: IT	120	0.76	0.36	100 %	100 %	0.056	0.973
Dimension #2: Fear	120	0.63	0.54				
Dimension #3: Dissociation	120	0.68	0.53				

Abréviations: α: Cronbach's α, δ: error δ, HJ: Loevinger's H scalability coefficient, CV: Rate of Convergence Validity, DV: Rate of Divergence Validity, RMSEA: Root Mean Square Error of Approximation, CFI: Comparative Fit Index, TI: Tonic Immobility.

4. Discussion

Notre étude fournit la première traduction française validée de la TIS pour soutenir une évaluation psychométrique de l'IT chez les adultes souffrant d'un TSPT. Notre échantillon était composé principalement de jeunes femmes, ce qui est cohérent avec la surreprésentation de TSPT dans ce groupe de population à risque (Changet al., 2017). La plupart des patients présentaient un TSPT à la suite d'un traumatisme interpersonnel, un événement associé à un risque accru de TSPT (Elderton et al., 2017). Nous pouvons donc soutenir que notre échantillon semble représentatif des patients civils atteints de TSPT dans la pratique clinique actuelle. Nos résultats ont montré que le FR-TIS a une bonne validité de face et de bonnes propriétés psychométriques sous la forme tridimensionnelle comprenant 8 items. La FR-TIS

semble être un outil facile à utiliser en pratique clinique pour identifier les individus à risque de TSPT sévère ou résistant au traitement, invitant les médecins à augmenter la surveillance dans le suivi médical tout en favorisant les messages de prévention possibles comme la délivrance d'informations concernant l'IT dans les agressions sexuelles en expliquant clairement que l'IT est un mécanisme de défense involontaire et non une forme de consentement (McCaulet al., 1990 ; Möller et al., 2017 ; Russo, 2017). La FR-TIS a également un rôle essentiel à jouer dans l'évaluation précoce des patients après un traumatisme. La FR-TIS complète ainsi les échelles cliniques existantes qui évaluent la dissociation péritraumatique (par exemple la PDEQ ou la PDI) et qui peuvent être utilisées en combinaison pour identifier les patients présentant un risque accru de TSPT après un traumatisme. En termes de recherche future, nous travaillons actuellement à l'établissement d'un score seuil pour les trois différentes dimensions de la FR-TIS afin d'aider les médecins à identifier plus précisément les patients présentant un surrisque de TSPT après un traumatisme impliquant l'IT. En outre, comme nous l'avons déjà écrit, la TIS est actuellement disponible dans plusieurs versions, en fonction de la langue, de la culture et de la population étudiée (civile ou militaire), avec des propriétés psychométriques différentes, que nous discuterons ci-dessous. Pour une évaluation standardisée de l'IT, il serait intéressant d'utiliser les données existantes pour définir une TIS internationalement valide comprenant les mêmes items.

En ce qui concerne la validité apparente, les patients ont donné un avis très positif sur la FR-TIS, en particulier sur sa rapidité, sa clarté et sa facilité d'utilisation, avec une bonne compréhension des items. La FR-TIS apparaît donc comme un outil d'évaluation simple. Cependant, les patients ont soulevé certaines limites concernant la FR-TIS (non liées à la langue), notamment des difficultés à se souvenir en détail de leur événement traumatique, en fonction de l'ancienneté de l'événement traumatique, de l'intensité de l'amnésie dissociative ou de la dissociation péritraumatique, et de l'intensité du comportement d'évitement actuel. Ces limites sont les mêmes pour d'autres échelles rétrospectives d'auto-évaluation de la dissociation péritraumatique (Brunet et al., 2001 ; Marmar et al.,2004). Ces limites sont difficiles à éviter si l'on considère l'évaluation rétrospective. Cependant, plus l'évaluation sera précoce et plus les biais de mémoire seront limités.

Concernant les propriétés psychométriques, la fiabilité de la FR-TIS s'est avérée satisfaisante, à l'exclusion de deux items évaluant l'intensité des tremblements (item 3) et de la sensation de froid (item 6) au cours de l'événement traumatique. Ces deux items ont été exclus dans une autre étude visant à valider la TIS de manière unidimensionnelle dans la population générale brésilienne (RMSEA = 0,029, CFI = 0,997) (Reichenheim et al., 2014). La FR-TIS à 8 items, lorsqu'elle est considérée à travers trois dimensions – l'IT avec quatre items, la peur avec deux items, et la dissociation péritraumatique avec deux items - a démontré une bonne fiabilité. L'approche tridimensionnelle est cliniquement pertinente pour distinguer l'IT du sentiment de peur et/ou de la dissociation péritraumatique. En utilisant cette approche, une étude auprès de 32 patients souffrant d'un TSPT après des violences urbaines a montré que la dimension IT avait une bonne fiabilité (α = 0,83) (Rocha-Rego et al.,2009). Une autre étude menée auprès de 184 patients souffrant d'un TSPT

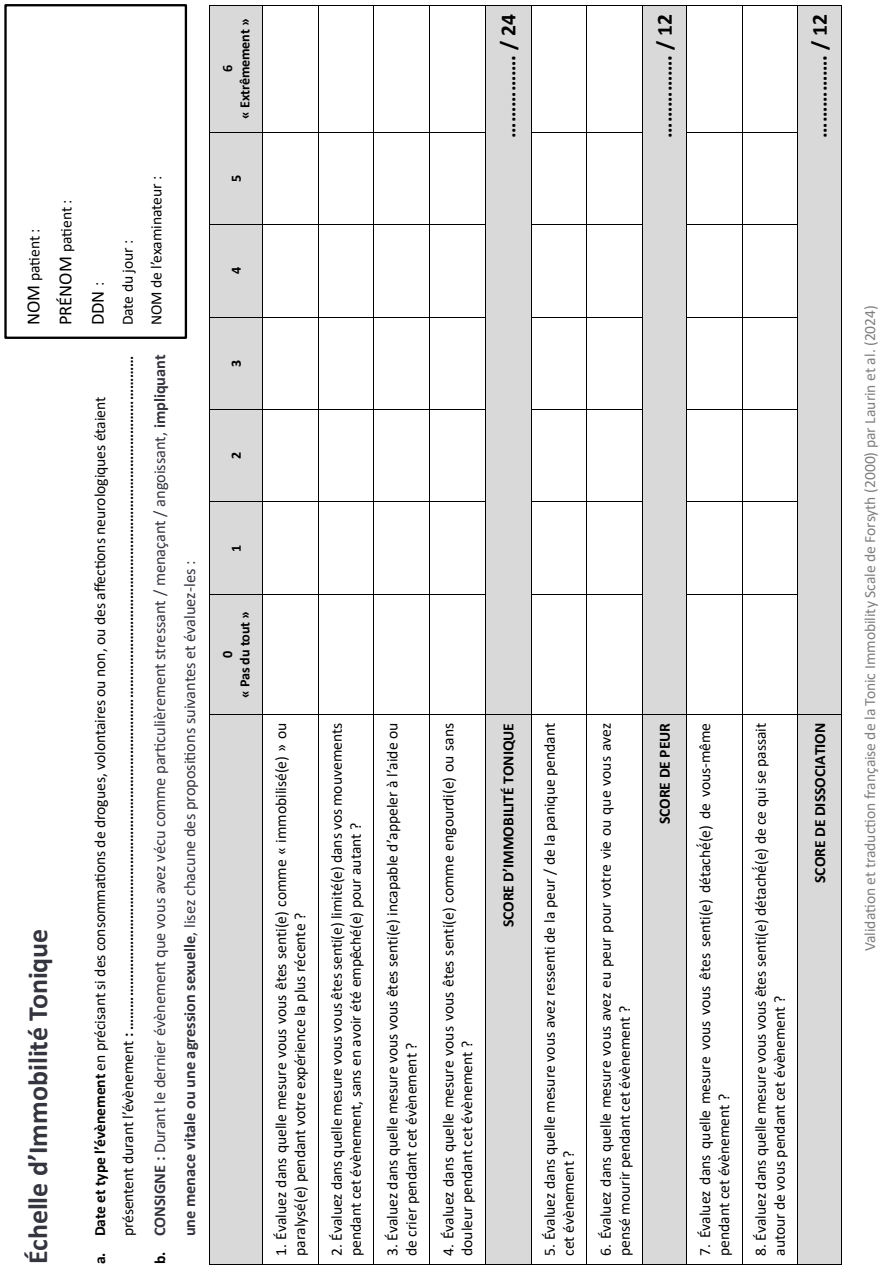
chronique a montré que la dimension IT avait également une bonne fiabilité ($\alpha = 0,71$) (de Kleineet al., 2018). Dans notre version française, la dimension IT composée de quatre items évaluant les symptômes les plus caractéristiques et importants de l'IT (sensation de paralysie, analgésie sans l'item concernant la sensation de froid) présente une fiabilité proche de ces mesures ($\alpha = 0,76$). En général, les tremblements sont associés à la dimension de la peur (Fusé et al., 2007), alors que les tremblements peuvent également être liés à l'IT (Kozlowskaet al., 2015). Il convient de noter que la dimension de la peur est la moins cohérente dans les études utilisant la TIS dans tous les types de traumatismes et pas seulement les violences sexuelles chez les femmes ($\alpha = 0,45$ (Hagenaars, 2016), $\alpha = 0,43$ (Bados et al., 2008) ou $\alpha = 0,52$ (de Kleineet al., 2018)). Avec deux items pour la peur, qui exclue les tremblements, notre version de la TIS montre une meilleure fiabilité sur ce point ($\alpha = 0,63$). Historiquement, les items de dissociation péritraumatique ont été associés soit à l'IT, soit à la dimension de peur (Fiszman et al., 2008 ; Forsyth et al., 2000 ; Fusé et al., 2007). Nous avons choisi d'isoler la dissociation péritraumatique avec deux items évaluant la dépersonnalisation et la déréalisation, qui présentent une fiabilité modérée ($\alpha = 0,68$). La distinction entre l'IT et dissociation péritraumatique est d'autant plus justifiée que le lien entre les deux est encore sujet à débat et pour certains, il s'agit de deux phénomènes de défense distincts (Zoellner, 2008). Allant dans ce sens, des patients ont rapporté des situations d'IT sans signes de déréalisation ou de dépersonnalisation (Hagenaars et Hagenaars, 2020). Pour d'autres, les deux phénomènes de défense que sont l'IT et la déréalisation / dépersonnalisation sont liés, un continuum dans lequel l'IT serait un niveau extrême de dissociation possiblement médié par les opioïdes (Smith, 2015).

Concernant les limites, il est important de noter le nombre élevé de questionnaires exclus dans notre étude. Les exclusions étaient principalement dues à des questionnaires informatisés incomplets. La version informatique de la FR-TIS semble avoir des limites, les patients rencontrant probablement des difficultés à remplir les questionnaires de la FR-TIS. On peut faire comme hypothèse que les patients qui remplissent seuls la FR-TIS peuvent réactiver un traumatisme et/ou être sujets à un comportement d'évitement limitant le remplissage du questionnaire. Le format papier de la FR-TIS semble plus approprié. Une autre limite à prendre en compte est le fait que le diagnostic de TSPT reposait sur l'auto-questionnaire de la PCL-5, sans un entretien semi-structuré. Enfin, les patients inclus dans l'étude qualitative ont parfois été incapables de préciser si l'IT était due à l'exposition à l'événement traumatique ou au contexte dans lequel il s'est produit, comme une paralysie due à une substance ou à un accident vasculaire cérébral. Il est donc important que les évaluateurs connaissent la date, le type et le contexte de l'exposition traumatique pour analyser correctement les résultats de la FR-TIS. Ces informations essentielles concernant l'événement traumatique ont été incluses dans la version finale en 8 items de la FR-TIS que nous proposons (Fig. 2).

5. Conclusion

La FR-TIS, composée de 8 items répartis en trois dimensions, est un outil potentiellement utile et facile à utiliser dans la pratique clinique, qui peut contribuer à améliorer le dépistage et l'évaluation de l'IT.

Figure 2 : La version française validée de l'échelle d'immobilité tonique.



Échelle d'Immobilité Tonique

NOM patient :
PRÉNOM patient :
DDN :
Date du jour :
NOM de l'examinateur :

a. **Date et type l'évènement** en précisant si des consommations de drogues, volontaires ou non, ou des affections neurologiques étaient présentent durant l'évènement : .....

b. **CONSIGNE :** Durant le dernier évènement que vous avez vécu comme particulièrement stressant / menaçant / angoissant, **impliquant une menace vitale ou une agression sexuelle**, lisez chacune des propositions suivantes et évaluez-les :

	0 « Pas du tout »	1	2	3	4	5	6 « Extrêmement »
1. Évaluez dans quelle mesure vous vous êtes senti(e) comme « immobilisé(e) » ou paralysé(e) pendant votre expérience la plus récente ?							
2. Évaluez dans quelle mesure vous vous êtes senti(e) limité(e) dans vos mouvements pendant cet évènement, sans en avoir été empêché(e) pour autant ?							
3. Évaluez dans quelle mesure vous vous êtes senti(e) incapable d'appeler à l'aide ou de crier pendant cet évènement ?							
4. Évaluez dans quelle mesure vous vous êtes senti(e) comme engourdi(e) ou sans douleur pendant cet évènement ?							
SCORE D'IMMOBILITÉ TONIQUE							**..... / 24**
5. Évaluez dans quelle mesure vous avez ressenti de la peur / de la panique pendant cet évènement ?							
6. Évaluez dans quelle mesure vous avez eu peur pour votre vie ou que vous avez pensé mourir pendant cet évènement ?							
SCORE DE PEUR							**..... / 12**
7. Évaluez dans quelle mesure vous vous êtes senti(e) détaché(e) de vous-même pendant cet évènement ?							
8. Évaluez dans quelle mesure vous vous êtes senti(e) détaché(e) de ce qui se passait autour de vous pendant cet évènement ?							
SCORE DE DISSOCIATION							**..... / 12**

Validation et traduction française de la Tonic Immobility Scale de Forsyth (2000) par Laurin et al. (2024)

Remerciements : Nous tenons à remercier sincèrement l'Association Justice Endométrioses et sa présidente Barbara Mvogoh, ainsi que Nantes Université pour leur aide dans la distribution du questionnaire aux victimes.

Source de financement : Il n'y a pas eu de source de financement pour cette étude.

Matériel complémentaire : Le matériel complémentaire associé à cet article se trouve, dans la version en ligne, à l'adresse suivante : doi: 10.1016/j.ejtd.2024.100449.

Bibliographie

Abrams, M. P., Carleton, R. N., Taylor, S., & Asmundson, G. J. G. (2009). Human tonic immobility: Measurement and correlates. Depression and Anxiety, 26(6), 550-556.https://doi.org/10.1002/da.20462

Ashbaugh, A. R., Houle-Johnson, S., Herbert, C., El-Hage, W., & Brunet, A. (2016). Psychometric validation of the English and French versions of the posttraumatic stress disorder checklist for DSM-5 (PCL-5). PLoS ONE, (10), 11. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161645

Bados, A., & Peró, M. (2015). Psychometric properties of the modified tonic immobility scale. Anales de Psicología/Annals of Psychology, 31(1), 66-73.

Bados, A., Toribio, L., & García-Grau, E. (2008). Traumatic events and tonic immobility. The Spanish Journal of Psychology, 11(2), 516-521. https://doi.org/10.1017/

Beaton, D. E., Bombardier, C., Guillemin, F., & Ferraz, M. B. (2000). Guidelines for the process of cross-cultural adaptation of self-report measures. Spine, 25(24),3186-3191. https://doi.org/10.1097/00007632-200012150-00014

Birmes, P., Brunet, A., Benoit, M., Defer, S., Hatton, L., Sztulman, H., & Schmitt, L. (2005). Validation of the Peritraumatic Dissociative Experiences Questionnaire self-report version in two samples of French-speaking individuals exposed to trauma.European Psychiatry: The Journal of the Association of European Psychiatrists, 20(2),145-151. https://doi.org/10.1016/j.eurpsy.2004.06.033

Bovin, M. J., Jager-Hyman, S., Gold, S. D., Marx, B. P., & Sloan, D. M. (2008). Tonic immobility mediates the influence of peritraumatic fear and perceived inscape ability on posttraumatic stress symptom severity among sexual assault survivors. Journal of Traumatic Stress, 21(4), 402-409. https://doi.org/10.1002/jts.20354

Bovin, M. J., Marx, B. P., Weathers, F. W., Gallagher, M. W., Rodriguez, P., Schnurr, P. P.,& Keane, T. M. (2016). Psychometric properties of the PTSD checklist for diagnostic and statistical manual of mental disorders-fifth edition (PCL-5) in veterans. Psychological Assessment, 28(11), 1379-1391. https://doi.org/10.1037/pas0000254

Brewin, C. R., Andrews, B., & Valentine, J. D. (2000). Meta-analysis of risk factors for post-traumatic stress disorder in trauma-exposed adults. Journal of Consulting and Clinical Psychology, 68(5), 748-766. https://doi.org/10.1037/0022-006X.68.5.748

Brunet, A., Ashbaugh, A. R., & Herbert, C. F. (2010). Internet Use in the Aftermath of Trauma, 72. los Press. https://books.google.fr/books?hI=fr&Ir=&id=wEQy6xtbcN0C&oi=fnd&pg=PR1&dq=Trauma+research +on+the -internet. +In: +Ashbaugh +AR, + Herbert+CF, +Brunet+A, + editors. +Internet +use +in +the+aftermath+of+trauma&ots=7kk3GCF_bH&sig=D9Pis_0KZ3yvfg6ILK8FCsOKghs.

Brunet, A., Weiss, D. S., Metzler, T. J., Best, S. R., Neylan, T. C., Rogers, C., Fagan, J., & Marmar, C. R. (2001). The peritraumatic distress inventory: A proposed measure of PTSD criterion A2. The American Journal of Psychiatry, 158(9), 1480-1485. https://doi.org/10.1176/appi.ajp.158.9.1480

Castiglioni, J. A., Russell, M. I., Setlow, B., Young, K. A., Welsh, J. C., & Steele-Russell, I. (2009). An animal model of hypnotic pain attenuation. Behavioural Brain Research,197(1), 198-204. https://doi.org/10.1016/j.bbr.2008.08.020

Chang, J. C., Yen, A. M. F., Chen, H. H., Chen, S. L. S., Chiu, S. Y. H., Fann, J. C. Y., &Lee, C. S (2017). Comorbid diseases as risk factors for incident posttraumatic stress disorder (PTSD) in a large community cohort (KCIS no. PSY4). Scientific Reports, 7(1). https://doi.org/10.1038/srep41276. Article 1.

Coimbra, B. M., Hoeboer, C. M., van Zuiden, M., Williamson, R. E., D'Elia, A. T., Mello, A. F., Mello, M. F., & Olff, M (2023). The relationship between tonic immobility and the development, severity, and course of posttraumatic stress disorder: Systematic and meta-analytic literature review. Journal of Anxiety Disorders, 97, Article 102730. https://doi.org/10.1016/j.janxdis.2023.102730A.

Covers, M. L. V., Huntjens, R. J. C., Hagenaars, M. A., Hehenkamp, L. M. J., & Bicanic, I. A. E. (2022). The tonic immobility scale in adolescent and young adultrape victims: Support for three-factor model. Psychological Trauma: Theory, Research, Practice and Policy, 14(5), 780-785. https://doi.org/10.1037/tra0001000

Darwin, C. (1929). The Expression of the Emotions in Man and Animals: And, The Autobiography, 1. Library of Alexandria. https://books.google.fr/books?hl=fr&1I=&id=906E70ukxUC&oi=fnd&pg=PT11&dq=The+expression+of+the+emotions+in+man+and+animals&ots=_HJajS1Xjp&sig=alcnbKQvVf_wgomLcryhLNgPjz4.

de Kleine, R. A., Hagenaars, M. A., & van Minnen, A. (2018). Tonic immobility during re-experiencing the traumatic event in posttraumatic stress disorder. Psychiatry Research, 270, 1105-1109. https://doi.org/10.1016/j.psychres.2018.06.051

deMello, R. A. F., Coimbra, B. M., Pedro, B. D. M., Benvenutti, I. M., Yeh, M. S. L., Mello, A. F., Mello, M. F., & Poyares, D. R. (2023). Peri-traumatic dissociation and tonic immobility as severity predictors of posttraumatic stress disorder after rape. Journal of Interpersonal Violence, 38(3-4), 4240-4266. https://doi.org/10.1177/08862605221114151

Dickstein, B., Weathers, F., Angkaw, A., Nievergelt, C., Yurgil, K., Nash, W., Baker, D., &Litz, B. (2014). Diagnostic utility of the posttraumatic stress disorder (PTSD) checklist for identifying full and partial PTSD in active-duty military. Assessment, 22. https://doi.org/10.1177/1073191114548683

Dokkedahl, S. B., Charny, S., & Lahav, Y. (2024). Testing previously proposed models of the Tonic Immobility Scale in a peritraumatic sample of Israeli civilians: Support fora three-factor model. Psychological Trauma: Theory, Research, Practice and Policy, 16(1), 21-29. https://doi.org/10.1037/tra0001499

Elderton, A., Berry, A., & Chan, C. (2017). A systematic review of posttraumatic growth in survivors of interpersonal violence in adulthood. Trauma, Violence, & Abuse, 18(2),223-236. https://doi.org/10.1177/1524838015611672

Fiszman, A., Mendlowicz, M. V., Marques-Portella, C., Volchan, E., Coutinho, E. S., Souza, W. F., Rocha, V., Lima, A. A., Salomão, F. P., Mari, J. J., & Figueira,

I. (2008). Peritraumatic tonic immobility predicts a poor response to pharmacological treatment in victims of urban violence with PTSD. Journal of Affective Disorders, 107(1-3), 193-197. https://doi.org/10.1016/j-jad.2007.07.015

Forsyth, J. P., Marx, B., Fusé, T., Heidt, J., & Gallup, G. G. (2000). The Tonic Immobility Scale-Adult Form. Albany, NY: Authors.

Fusé, T., Forsyth, J. P., Marx, B., Gallup, G. G., & Weaver, S. (2007). Factor structure of the tonic immobility scale in female sexual assault survivors: An exploratory and confirmatory factor analysis. Journal of Anxiety Disorders, 21(3), 265-283. https://doi.org/10.1016/j.janxdis.2006.05.004

Galliano, G., Noble, L. M., Travis, L. A., & Puechl, C. (1993). Victim reactions during rape/sexual assault: A preliminary study of the immobility response and its correlates. Journal of Interpersonal Violence, 8(1), 109-114. https://doi.org/10.1177/08862609300800100!

Gentle, M. J., Jones, R. B., & Woolley, S. C. (1989). Physiological changes during tonic immobility in Gallus gallus var domesticus. Physiology & Behavior, 46(5), 843-847.https://doi.org/10.1016/0031-9384(89)90046-2

Hagenaars, M. A. (2016). Tonic immobility and PTSD in a large community sample. Journal of Experimental Psychopathology, 7(2), 246-260. https://doi.org/10.5127/jep.051915

Hagenaars, M. A., & Hagenaars, J. A. P. (2020). Tonic immobility predicts poorer recovery from posttraumatic stress disorder. Journal of Affective Disorders, 264,365-369. https://doi.org/10.1016/j-jad.2019.11.027

Hagenaars, M. A., Oitzl, M., & Roelofs, K. (2014). Updating freeze: Aligning animal and human research. Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 47, 165-176. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2014.07.021

Heidt, J. M., Marx, B. P., & Forsyth, J. P. (2005). Tonic immobility and childhood sexual abuse: A preliminary report evaluating the sequela of rape-induced paralysis.Behaviour Research and Therapy, 43(9), 1157-1171. https://doi.org/10.1016/j.brat.2004.08.005

Humphreys, K. L.., Sauder, C. L., Martin, E. K., & Marx, B. P. (2010). Tonic immobility in childhood sexual abuse survivors and its relationship to posttraumatic stress symptomatology. Journal of Interpersonal Violence, 25(2), 358-373. https://doi.org/10.1177/0886260509334412

Jehel, L., Brunet, A., Paterniti, S., & Guelfi, J. D. (2005). [Validation of the peri traumatic distress inventory's French translation]. Canadian Journal of Psychiatry. Revue Canadienne De Psychiatrie, 50(1), 67-71. https://doi.org/10.1177/070674370505000112

Kalaf, J., Coutinho, E. S. F., Vilete, L. M. P., Luz, M. P., Berger, W., Mendlowicz, M.,Volchan, E., Andreoli, S. B., Quintana, M. I., de, Jesus, Mari, J., & Figueira, I. (2017).Sexual trauma is more strongly associated with tonic immobility than other types of trauma A population based study. Journal of Affective Disorders, 215, 71-76. https://doi.org/10.1016/j.jad.2017.03.009

Kalaf, J., Vilete, L. M. P., Volchan, E., Fiszman, A., Coutinho, E. S. F., Andreoli, S. B.,Quintana, M. I., de, Jesus, Mari, J., & Figueira, I. (2015). Peritraumatic tonic immobility in a large representative sample of the general population: Association with posttraumatic stress disorder and female gender. Comprehensive Psychiatry, 60,68-72.

https://doi.org/10.1016/j.comppsych.2015.04.001
Kessler, R. C., Avenevoli, S., Costello, J., Green, J. G., Gruber, M. J., McLaughlin, K. A., Petukhova, M., Sampson, N. A., Zaslavsky, A. M., & Merikangas, K. R. (2012). Severity of 12-month DSM-IV disorders in the National comorbidity survey replication adolescent supplement. Archives of General Psychiatry, 69(4), 381-389.https://doi.org/10.1001/archgenpsychiatry.2011.1603
Kessler, R. C., Sonnega, A., Bromet, E., Hughes, M., & Nelson, C. B. (1995). Posttraumaticstress disorder in the National comorbidity survey. Archives of General Psychiatry, 52(12), 1048-1060. https://doi.org/10.1001/archpsyc.1995.03950240066012
Klemm, W. R. (1971). Neurophysiologic studies of the immobility reflex (« animal hypnosis »). Neurosciences Research, 4, 165-212.
Koenen, K. C., Ratanatharathorn, A., Ng, L., McLaughlin, K. A., Bromet, E. J., Stein, D. J.,Karam, E. G., Meron Ruscio, A., Benjet, C., Scott, K., Atwoli, L., Petukhova, M.,Lim, C. C. W., Aguilar-Gaxiola, S., Al-Hamzawi, A., Alonso, J., Bunting, B.,Ciutan, M., de Girolamo, G., & Kessler, R. C. (2017). Posttraumatic stress disorder inthe World mental health surveys. Psychological Medicine, 47(13), 2260-2274. https://doi.org/10.1017/S0033291717000708
Kozlowska, K., Walker, P., McLean, L., & Carrive, P. (2015). Fear and the defense cascade: Clinical implications and management. Harvard Review of Psychiatry, 23(4),263-287. https://doi.org/10.1097/HRP.0000000000000065
Krüger-Gottschalk, A., Knaevelsrud, C., Rau, H., Dyer, A., Schäfer, I., Schellong, J., &Ehring, T. (2017). The German version of the Posttraumatic stress disorder checklistfor DSM-5 (PCL-5): Psychometric properties and diagnostic utility. BMC Psychiatry,17(1), 379. https://doi.org/10.1186/s12888-017-1541-6
Lima, A. A., Fiszman, A., Marques-Portella, C., Mendlowicz, M. V., Coutinho, E. S. F.,Maia, D. C. B., Berger, W., Rocha-Rego, V., Volchan, E., Mari, J. J., & Figueira, I.(2010). The impact of tonic immobility reaction on the prognosis of posttraumatic stress disorder. Journal of Psychiatric Research, 44(4), 224-228. https://doi.org/10.1016/j.jpsychires.2009.08.005
Lloyd, C. S., Lanius, R. A., Brown, M. F., Neufeld, R. J., Frewen, P. A., & McKinnon, M. C. (2019). Assessing post-traumatic tonic immobility responses: The scale for tonic immobility occurring post-trauma, 3. Chronic Stress, Article 2470547018822492. https://doi.org/10.1177/2470547018822492 (Thousand Oaks, Calif.).
Maia, D. B., Nobrega, A., Marques-Portella, C., Mendlowicz, M. V., Volchan, E., Coutinho, E. S., & Figueira, I. (2015). Peritraumatic tonic immobility is associatedwith PTSD symptom severity in Brazilian police officers: A prospective study. Revista Brasileira De Psiquiatria (Sao Paulo, Brazil: 1999), 37(1), 49-54. https://doi.org/10.1590/1516-4446-2013-1267
Marmar, C. R., Metzler, T. J., & Otte, C. (2004). The peritraumatic dissociative experiences questionnaire. The Guilford Press. https://psycnet.apa.org/record/2004-21033-006.
McCaul, K. D., Veltum, L. G., Boyechko, V., & Crawford, J. J. (1990). Understanding attributions of victim blame for rape: Sex, violence, and foreseeability 1. Journal ofApplied Social Psychology, 20(1), 1-26. https://doi.org/10.1111/j.1559-1816.1990.

Möller, A., Söndergaard, H. P., & Helström, L. (2017). Tonic immobility during sexual assault-A common reaction predicting post-traumatic stress disorder and severe depression. Acta Obstetricia Et Gynecologica Scandinavica, 96(8), 932-938. https://doi.org/10.1111/aogs.13174

Monassi, C. R., Hoffmann, A., & Menescal-de-Oliveira, L. (1997). Involvement of the cholinergic system and periaqueductal gray matter in the modulation of tonic immobility in the guinea pig. Physiology & Behavior, 62(1), 53-59. https://doi.org/10.1016/s0031-9384(97)00134-0

Ozer, E. J., Best, S. R., Lipsey, T. L.., & Weiss, D. S. (2003). Predictors of posttraumatic stress disorder and symptoms in adults: A meta-analysis. Psychological Bulletin, 129(1), 52-73. https://doi.org/10.1037/0033-2909.129.1.52

Pivac, N., Vuic, B., Sagud, M., Nedic Erjavec, G., Nikolac Perkovic, M., Konjevod, M.,Tudor, L., Svob Strac, D., Uzun, S., Kozumplik, O., Uzun, S., & Mimica, N. (2023).PTSD, immune system, and inflammation. Advances in Experimental Medicine andBiology, 1411, 225-262. https://doi.org/10.1007/978-981-19-7376-5_11

Portugal, L. C. L., Pereira, M. G., Alves, R., de, C. S., Tavares, G., Lobo, I., Rocha-Rego, V., Marques-Portella, C., Mendlowicz, M. V., Coutinho, E. S., Fiszman, A., Volchan, E.,Figueira, I., & Oliveira, L.de. (2012). Peritraumatic tonic immobility is associated with posttraumatic stress symptoms in undergraduate Brazilian students. Revista Brasileira De Psiquiatria (Sao Paulo, Brazil: 1999), 34(1), 60-65. https://doi.org/10.1590/1516-44462012000100011

Qi, W., Gevonden, M., & Shalev, A. (2016). Prevention of post-traumatic stress disorder after trauma: Current evidence and future directions. Current Psychiatry Reports, 18(2), 20. https://doi.org/10.1007/s11920-015-0655-0

Ramos, C., Leite-Panissi, R., Monassi, R., & Menescal-De-Oliveira, L (1999). Role of the amygdaloid nuclei in the modulation of tonic immobility in guinea pigs. Physiology &Behavior, 67(5), 717-724. https://doi.org/10.1016/s0031-9384(99)00133-x|

Reichenheim, M., Souza, W., Coutinho, E. S. F., Figueira, L., Quintana, M. I., Mello, M. F.de, Bressan, R. A., Mari, J.de J., & Andreoli, S. B (2014). Structural validity of the tonic immobility scale in a population exposed to trauma: Evidence from two large Brazilian Samples. PLOS ONE, 9(4), e94367. https://doi.org/10.1371/journal,pone.0094367

Rivers, W. H. R. (1922). The danger-instincts. Instinct and the unconscious: A contributionto a Biological Theory of the Psycho-Neuroses (2nd ed, p. 52-60). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1037/11187-007

Rocha-Rego, V., Fiszman, A., Portugal, L. C., Garcia Pereira, M., de Oliveira, L., Mendlowicz, M. V., Marques-Portella, C., Berger, W., Freire Coutinho, E. S., Mari, J. J., Figueira, I., & Volchan, E. (2009). Is tonic immobility the core sign among conventional peritraumatic signs and symptoms listed for PTSD? Journal of Affective Disorders, 115(1-2), 269-273. https://doi.org/10.1016/j.jad.2008.09.005

Roelofs, K. (2017). Freeze for action: Neurobiological mechanisms in animal and human freezing. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 372, Article 20160206. https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0206

Rosendahl, J., Kisyova, H., Gawlytta, R., & Scherag, A. (2019). Comparative validation of three screening instruments for posttraumatic stress disorder after intensive care. Jounal of Critical Care, 53, 149-154. https://doi.org/10.1016/j.jcrc.2019.06.016

Russo, F. (2017). Sexual assault may trigger involuntary paralysis. Scientific American. https://www.scientificamerican.com/article/sexual-assault-may-trigger-involuntary-paralysis/.

Smith, M. (2015). Neurobiology and treatment of traumatic dissociation: Toward an embodied self. Archives of Women's Mental Health, 18(2), 265-266. https://doi.org/10.1007/s00737-014-0487-7

Suarez, S. D., & Gallup, G. G. (1979). Tonic immobility as a response to rape in humans at theoretical note. The Psychological Record, 29(3), 315-320. https://doi.org/10.1007/BF03394619

Volchan, E., Rocha-Rego, V., Bastos, A. F., Oliveira, J. M., Franklin, C., Gleiser, S.,

Berger, W., Souza, G. G. L., Oliveira, L., David, I. A., Erthal, F. S., Pereira, M. G., &

Figueira, I. (2017). Immobility reactions under threat: A contribution to human defensive cascade and PTSD. Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 76, 29-38. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.01.025.

von der Warth, R., Dams, J., Grochtdreis, T., & Konig, H. H. (2020). Economic evaluations and cost analyses in posttraumatic stress disorder: A systematic review. European Journal of Psychotraumatology, 11(1), 1753940. https://doi.org/10.1080/20008198.2020.1753940

Weathers, F.W., Litz, B.T., Keane, T.M., Palmieri, P.A., Marx, B.P., & Schnurr, P.P. (2013). The PTSD checklist for dsm-5 (pcl-5). https://www.london-spring.org/post-traumatic-stress-disorder-journal-pdf/.

World Health Organization (WHO) (2018). ICD-11 mortality and morbidity statistics. Mental, behavioural or neurodevelopmental disorders. https://icd.who.int/dev11/l-m/en#/http%3a%2f%2fid.who.int%2ficd%2fentity%2f1630268048.

Zoellner, L. A. (2008). Translational challenges with tonic immobility. Clinical Psychology: A Publication of the Division of Clinical Psychology of the American Psychological Association, 15(1), 98-101. https://doi.org/10.1111/j.1468-2850.2008.00114.x

PARTIE 5 :

DISCUSSION GÉNÉRALE

L'un des objectifs principaux de ce travail de thèse était d'explorer les altérations de la conscience corporelle dans le trouble de stress post-traumatique (TSPT) et son sous-type dissociatif (TSPT-DS). Pour ce faire, nous avons choisi comme paradigme expérimental l'illusion de la main en caoutchouc (RHI) dans sa version dynamique qui permet d'évaluer simultanément deux dimensions fondamentales de la conscience corporelle : le sens de propriété du corps (Sense of Body Ownership, SBO) et le sens d'agentivité (Sense of Agency, SoA) (Kalckert & Ehrsson, 2012). Ce choix méthodologique se justifie par l'ancrage théorique de ces processus dans les modèles bayésiens de la perception, qui considèrent que la conscience corporelle émerge de l'intégration dynamique entre prédictions internes et signaux sensoriels. C'est pour ces raisons que notre travail a commencé par poser un cadre théorique, en proposant une approche dimensionnelle des troubles de la conscience du corps dans le TSPT et TSPT-DS, qui a ensuite été testée avec une première approche expérimentale basée sur la RHI dynamique.

Nos résultats apportent plusieurs éléments nouveaux. Ils montrent d'abord que les patients souffrant d'un TSPT ou d'un TSPT-DS présentent des altérations de la conscience corporelle mesurables au moyen de la RHI dynamique. Surtout, ils révèlent l'existence de profils différenciés entre TSPT et TSPT-DS, suggérant que le sous-type dissociatif se caractérise par des anomalies plus marquées et qualitativement distinctes. Ces données ouvrent des pistes pour mieux comprendre les bases neurocognitives des symptômes traumatiques, affiner les modèles explicatifs et envisager de nouvelles perspectives thérapeutiques.

Nos résultats confirment que le TSPT est associé à une altération du SBO et du SoA, traduisant une perturbation de la relation au corps dans un contexte marqué par l'intrusion, l'évitement et l'hyperéveil. Les patients avec TSPT non-dissociatif montrent notamment un fort SoA et une légère fragilité de la discrimination soi-autrui en cas de biais temporel entre les stimulations sensori-proprio-kinesthésiques et les informations visuelles. En revanche, le profil des patients TSPT-DS se distingue par une altération de la conscience du corps plus profonde. En effet, les informations sensorielles sont plus saillantes avec un biais proprioceptif fort, une absence de la dissocation SBO et SoA – cette absence de dissociation entre le SBO et le SoA a déjà été mise en évidence dans une étude antérieurs portant chez les patients souffrant de schizophrénie avec des symptômes de premier rang (Laurin et al., 2021) - et une discrimination soi-autrui dépendante du SoA des mouvements volontaires, et donc de l'atténuation sensorielle qui en résulte.

Ces résultats confirment l'hypothèse selon laquelle le TSPT et son sous-type dissociatif représentent deux profils distincts d'altérations du système de prédiction-perception. Ils apportent également un argument en faveur de l'approche dimensionnelle : la variabilité du SBO et du SoA au sein du TSPT pourrait constituer un marqueur clinique pertinent pour identifier les sous-types et prédire l'évolution des symptômes.

Cette thèse présente plusieurs apports originaux. D'abord, elle propose la première étude française utilisant la RHI dynamique pour explorer la conscience corporelle dans le TSPT. Ensuite, elle met en évidence de manière explicite les différences entre

TSPT et TSPT-DS dans ce paradigme, ce qui contribue à une meilleure compréhension des mécanismes neurocognitifs de la dissociation. L'originalité réside également dans l'articulation entre la clinique du psychotraumatisme et les modèles computationnels de la perception. Ce cadre explicatif dépasse les modèles purement neurobiologiques ou cognitifs et offre une perspective intégrative pour penser le TSPT comme un trouble de la prédiction.

Il est important de nuancer ces résultats à la lumière de certaines limites. Premièrement, les effectifs restent relativement restreints, ce qui peut limiter la généralisation des résultats et réduire la puissance statistique des analyses. Deuxièmement, le paradigme de la RHI, bien qu'efficace pour isoler SBO et SoA, ne capture pas l'ensemble de la complexité du vécu corporel, notamment dans sa dimension qualitative. Troisièmement, la suggestibilité, les biais cognitifs et les mécanismes d'évitement propres aux patients traumatisés peuvent influencer leur engagement dans la tâche, créant un biais potentiel. Enfin, l'absence de mesures physiologiques ou neurobiologiques complémentaires limite l'interprétation mécanistique des résultats.

5.1. Perspectives de recherche

Ainsi, plusieurs perspectives de recherche peuvent émerger à partir de ce travail de recherche, à savoir :

- Approches multimodales : L'association de la RHI dynamique avec des techniques de neuroimagerie et d'électrophysiologie représente une étape importante dans la suite de nos travaux. L'utilisation de l'électroencéphalogramme (EEG) permettrait d'explorer la dynamique temporelle de la correction des erreurs de prédiction générée par RHI dynamique, l'EEG étant une technique présentant une bonne résolution temporelle pour comprendre les processus cognitifs impliqués dans la RHI dynamique, tandis que l'IRM fonctionnelle (Imagerie par Résonnance Magnétique, IRMf) offrirait quant à elle des données sur la connectivité des régions impliquées avec une meilleure résolution spatiale que l'EEG. Ces approches multimodales pourraient ainsi préciser les mécanismes neurocognitifs impliqués dans les troubles de la conscience du corps qui peuvent être mises en évidence par la RHI dynamique en différenciant le TSPT du TSPT-DS ;
- Mesures physiologiques associées à la RHI dynamique : La prise en compte de paramètres tels que la fréquence cardiaque, la variabilité cardiaque ou la conductance cutanée offrirait des indices objectifs sur l'implication du système nerveux autonome lors de l'illusion perceptuelle. Ces mesures permettraient de relier plus directement le vécu corporel subjectif aux réactions physiologiques ;
- Mesures objectives du sens d'agentivité : Dans nos travaux, la mesure du sens d'agentivité est limitée à des mesures subjective perceptuelle par auto-questionnaire. Il serait tout à fait pertinent de pousser plus en profondeur l'étude des altérations du SoA dans le TSPT et le TSPT-DS en étudiant des mesures objectives du SoA. Ces mesures objectives du SoA peuvent inclure des mesures de l'atténuation sensorielle (Braun et al., 2018; Haggard, 2017; Moore, 2016) ou du liage intentionnel (Haggard

et al., 2002) permettant ainsi de préciser les différentes atteintes du SoA entre le TSPT et le TSPT-DS ;

- Mesures qualitatives : Il serait pertinent d'explorer le vécu subjectif de la RHI par des entretiens qualitatifs. Ces approches pourraient éclairer la manière dont les patients avec TSPT ou TSPT-DS interprètent l'illusion perceptuelle, ainsi que le SoA, permettant ainsi de mieux comprendre les liens entre l'appropriation corporelle et le sentiment d'étrangeté. Elles enrichiraient la compréhension des résultats quantitatifs et donneraient une profondeur phénoménologique à l'étude ;
- Confirmation de la réaction traumatique : Un enjeu méthodologique important est de confirmer que les résultats observés à la RHI dynamique traduisent bien une réponse traumatique spécifique, et non une variabilité interindividuelle non liée au trauma. Nous avons établi un protocole qui devait permettre une réaction traumatique incluant des échelles de plus en plus centrées sur le trauma et réalisées juste avant les tâches expérimentales de la RHI dynamique. Pour aller au bout de la démarche méthodologique, et confirmer leur pertinence, des travaux évaluant l'efficacité de la réaction traumatique au moyen des échelles traumatiques et de dissociation péritraumatique sont essentielles à réaliser ;
- Vers une stratification diagnostique : Une question centrale est celle de savoir si la réponse à la RHI pourrait contribuer à définir des sous-types de TSPT. L'intensité et la qualité du SBO/SoA pourraient constituer des critères discriminants entre le TSPT classique et le TSPT-DS, ouvrant la voie à une approche diagnostique plus fine et dimensionnelle. En tout cas, nos résultats renforcent la pertinence du DSM-5 à distinguer le TSPT du TSPT-DS selon les symptômes dissociatifs de déréalisation et dépersonnalisation, eux-mêmes inspirés par les travaux d'imagerie et de neurobiologie sur le sujet. De la même manière, nous avons validé une échelle d'évaluation de l'immobilité tonique pour affiner le diagnostic et identifier au plus tôt les TSPT associés à la TIS qui sont de plus mauvais pronostic et plus résistant aux traitements pharmacologiques. Il nous reste maintenant à déterminer un score *cut-off* à la TIS qui permettrait au clinicien de pouvoir avoir en pratique une vigilance accrue pour des patients à risque de développer un TSPT sévère et résistant. De plus, nous pensons que d'autres échelles pourraient être développer et valider en français, comme le questionnaire de l'immobilité tonique qui est plus moderne et validée en anglais en population générale hors agression sexuelle (Abrams et al., 2009). La validation de telles échelle devraient permettre de favoriser la diffusion de messages de prévention sur le caractère involontaire et défensif de l'immobilité tonique et prévenir ainsi les complications, notamment dépressives, de ce type de vécu lors d'un trauma, et surtout à la suite d'agressions sexuelles (McCaul et al., 1990; Möller et al., 2017; Russo, 2017).

5.2. Retombées cliniques et thérapeutiques

Au-delà des perspectives de recherche, ce travail comporte des implications cliniques importantes. La mise en évidence d'altérations différentielles de la conscience corporelle plaide pour une personnalisation des approches thérapeutiques.

En particulier, les techniques de neurostimulation pourraient être adaptées en fonction des profils identifiés. Nous résultats ont montré que cibler le CPFdl gauche avec la tDCS a peu d'intérêt pour améliorer les troubles de la conscience du corps dans le TSPT et le TSPT-DS. Plutôt que de cibler exclusivement le CPFdl, il serait pertinent d'explorer d'autres cibles comme le cervelet ou l'insula antérieure qui sont en lien direct avec l'intégration corporelle. Dans une approche additive du SBO/SoA, ces cibles thérapeutiques qui l'insula semblent à la fois impliquées dans le SBO et le SoA (Seghezzi et al., 2019). Ces nouvelles orientations pourraient améliorer l'efficacité thérapeutique et réduire la variabilité des réponses.

Par ailleurs, une meilleure compréhension des mécanismes corporels du TSPT pourrait contribuer à une réduction des coûts de prise en charge. Nous avons réalisé une étude récente estimant que le coût annuel des traitements pharmacologiques en France chez les patients hospitalisés avec un diagnostic principal de TSPT à 531.04€, incluant 353.08€ pour les traitements non-psychotropes et 207.06€ pour les traitements psychotropes (Laurin et al., 2025). En identifiant les patients selon leur profil corporel et dissociatif, il serait possible d'orienter plus rapidement vers des traitements adaptés (thérapies centrées sur le corps, activité physique adaptée, neurostimulation ciblée), évitant ainsi des parcours longs et coûteux marqués par des échecs thérapeutiques répétés. Par exemple, proposer des activités physiques adaptées qui vont améliorer la conscience intéroceptive dans le TSPT-DS, alors que dans le TSPT il serait plus intéressant de renforcer la régulation de la conscience intéroceptive ou proposer des activités physiques adaptées qui vont renforcer l'extéroception. À cette fin, nous sommes en train de réaliser une étude sur l'impact de l'approche *Tension and Releasing Exercice* (TRE) sur la conscience intéroceptive dans le TSPT.

Bibliographie

Abrams, M. P., Carleton, R. N., Taylor, S., & Asmundson, G. J. G. (2009). Human tonic immobility : Measurement and correlates. Depression and Anxiety, 26(6), 550-556. https://doi.org/10.1002/da.20462

Braun, N., Debener, S., Spychala, N., Bongartz, E., Sörös, P., Müller, H. H. O., & Philipsen, A. (2018). The Senses of Agency and Ownership : A Review. Frontiers in Psychology, 9, 535. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00535

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

Haggard, P., Clark, S., & Kalogeras, J. (2002). Voluntary action and conscious awareness. Nature Neuroscience, 5(4), 382-385. https://doi.org/10.1038/nn827

Kalckert, A., & Ehrsson, H. H. (2012). Moving a Rubber Hand that Feels Like Your Own : A Dissociation of Ownership and Agency. Frontiers in Human Neuroscience, 6, 40. https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00040

Laurin, A., Artarit, P., Vanhille, J.-L., Bulteau, S., Sauvaget, A., Fanton, L., & Nohales, L. (2025). The cost of pharmacological treatments for post-traumatic stress disorder in a French patient sample : A health economic cohort study. European Journal of Trauma & Dissociation, 9(1), 100517. https://doi.org/10.1016/j.ejtd.2025.100517

Laurin, A., Ramoz, N., Ameller, A., Dereux, A., Zajac, J., Tébéka, S., Le Strat, Y., & Dubertret, C. (2021). Self-recognition impairments in schizophrenia with and without first rank symptoms using the moving rubber hand illusion. Consciousness and Cognition, 93(103154). https://doi.org/10.1016/j.concog.2021.103154

McCaul, K. D., Veltum, L. G., Boyechko, V., & Crawford, J. J. (1990). Understanding Attributions of Victim Blame for Rape : Sex, Violence, and Foreseeability 1. Journal of Applied Social Psychology, 20(1), 1-26. https://doi.org/10.1111/j.1559-1816.1990.tb00375.x

Möller, A., Söndergaard, H. P., & Helström, L. (2017). Tonic immobility during sexual assault—A common reaction predicting post-traumatic stress disorder and severe depression. Acta Obstetricia Et Gynecologica Scandinavica, 96(8), 932-938. https://doi.org/10.1111/aogs.13174

Moore, J. W. (2016). What is the sense of agency and why does it matter? Frontiers in psychology, 7, 209433.

Russo, F. (2017). Sexual Assault May Trigger Involuntary Paralysis. Scientific American. https://www.scientificamerican.com/article/sexual-assault-may-trigger-involuntary-paralysis/

Seghezzi, S., Giannini, G., & Zapparoli, L. (2019). Neurofunctional correlates of body-ownership and sense of agency : A meta-analytical account of self-consciousness. Cortex, 121, 169-178. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2019.08.018

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail met en évidence que la conscience corporelle constitue un marqueur différentiel essentiel entre TSPT et TSPT-DS. À travers la RHI dynamique, nous avons pu objectiver des profils distincts d'altération du SBO et du SoA, reflétant deux modalités différentes d'engagement corporel dans le traumatisme et la dissociation.

Ces résultats renforcent l'idée que le TSPT n'est pas une entité homogène, mais un spectre de perturbations où la relation au corps joue un rôle central. C'est ainsi que nous avons proposé un modèle dimensionnel des troubles de la conscience corporelle à partir de la théorie prédictive et de l'inférence Bayésienne. Nos résultats ouvrent des perspectives prometteuses pour la recherche future, à travers des approches multimodales et qualitatives, et pour la clinique, à travers des interventions personnalisées ciblant les mécanismes corporels.

En définitive, cette thèse souligne l'importance de replacer le corps au cœur de la compréhension et du traitement du psychotraumatisme, en considérant la conscience corporelle comme un levier diagnostique, pronostique et thérapeutique.

COLLEGE DOCTORAL PAYS DE LA LOIRE
ED EDUCATION, COGNITION, LANGAGES, INTERACTIONS, SANTE
Nantes Université

Titre : Troubles de la conscience du corps dans le trouble de stress post-traumatique : de la compréhension à la thérapeutique, une approche intégrative

Mots clés : Trouble de stress post-traumatique; Dissociation; Propriété du corps; Agentivité; Illusion de la main en caoutchouc; Immobilité tonique; Neuromodulation; Psychiatrie computationnelle.

Résumé : Le trouble de stress post-traumatique (TSPT) est un trouble psychiatrique invalidant marqué par des perturbations de la conscience corporelle. Cette thèse avait pour objectif d'explorer ces altérations dans le TSPT selon le sous-type dissociatif (TSPT-DS) en utilisant l'illusion de la main en caoutchouc dynamique (RHI) tout en analysant les effets de la stimulation électrique transcrânienne (tDCS).
En se basant sur la théorie prédictive et l'inférence bayésienne, nous avons reconceptualisé le TSPT, ainsi que le TSPT-DS, en proposant un modèle dimensionnel des troubles de la conscience du corps.
Dans la partie expérimentale utilisant la RHI, nos résultats ont montré que le TSPT s'accompagne d'anomalies du sens de propriété du corps (SBO) et du sens d'agentivité (SoA) qui sont spécifiques et distincts selon la nature dissocative du TSPT.
Les patients avec un TSPT se caractérisaient par un SoA élevé et une discrimination soi-autrui légèrement affectée par un biais temporel. Les patients souffrant d'un TSPT-DS présentaient quant à eux un biais proprioceptif élevé, un SoA dépendant du SBO et une discrimination soi-autrui fortement dépendante de l'atténuation sensorielle des mouvements volontaires. La tDCS *on-line* avec une stimulation anodale du cortex préfrontal dorsolateral gauche améliorait le SoA sans modulation du SBO. Parallèlement, nous avons traduit et validé la version française de la *Tonic Immobility Scale* (TIS) en confirmant sa fiabilité psychométrique et son intérêt clinique.
En conclusion, cette thèse met en évidence le rôle central de la conscience du corps dans le TSPT en proposant une approche intégrative et ouvrant la voie à une médecine personnalisée du psychotraumatisme.

Title : Body consciousness impairments in post-traumatic stress disorder : from understanding to treatment, an integrative approach

Keywords : Post traumatic stress disorder; Dissociation; Body ownership; Agency; Rubber hand illusion; Tonic immobiliy; Neuromodulation; Computational psychiatry.

Abstract : Post-traumatic stress disorder (PTSD) is a debilitating psychiatric disorder characterized by body consciousness disturbances. The aim of this thesis was to explore these alterations in PTSD, according to the PTSD dissociative subtype (PTSD-DS), using the dynamic rubber hand illusion (RHI) while assessing the effects of transcranial direct current stimulation (tDCS).
Based on predictive theory and Bayesian inference, we have reconceptualized PTSD, as well as PTSD-DS, by proposing a dimensional model of body consciousness impairments.
In the experimental part using RHI, our results showed that PTSD had specific and distinct abnormalities in sense of body ownership (SBO) and agency (SoA) depending on the dissociative nature of PTSD.
Patients with PTSD are characterized by high SoA and self-other discrimination slightly affected by temporal bias. On the other hand, patients with PTSD-DS had high proprioceptive bias, SBO-dependent SoA, self-other discrimination was highly dependent on sensory attenuation of voluntary movements. Online tDCS with anodal stimulation of the left dorsolateral prefrontal cortex improved SoA but did not modulate SBO.
At the same time, we translated and validated the French version of the Tonic Immobility Scale (FR-TIS), confirming its psychometric reliability and clinical relevance.
In conclusion, this thesis highlights the central role of body awareness in PTSD by proposing an integrative approach and paving the way for personalized medicine for psychological trauma.