



**HAL**  
open science

# Contributions sensorimotrices à la représentation de soi révélées par téléprésence robotique

David Farizon

► **To cite this version:**

David Farizon. Contributions sensorimotrices à la représentation de soi révélées par téléprésence robotique. Neurosciences. Université de Lyon, 2021. Français. NNT : 2021LYSE1077 . tel-03622013

**HAL Id: tel-03622013**

**<https://theses.hal.science/tel-03622013v1>**

Submitted on 28 Mar 2022

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

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

N°d'ordre NNT : 2021LYSE1077



# **THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON**

opérée au sein de  
**l'Université Claude Bernard Lyon 1**

**Ecole Doctorale N° 476**  
**Ecole Doctorale Neurosciences et Cognition (NSCO)**

**Spécialité de doctorat : Neurosciences et Cognition**

Soutenue publiquement le 23/04/2021, par :

**David Farizon**

---

## **Contributions sensorimotrices à la représentation de soi révélées par téléprésence robotique**

---

Devant le jury composé de :

Coello, Yann Rapporteur	Professeur des Universités	Université de Lille
Tapus, Adriana Rapporteuse	Professeure ENSTA	Institut Polytechnique
Dominey, Peter Examineur	Directeur de Recherche CNRS	Université de Bourgogne
Fourneret, Pierre Examineur	Professeur des Universités	Université Lyon 1
Ventre-Dominey, Jocelyne Directrice de thèse	Chargé de Recherche INSERM	Université de Bourgogne



# **Université Claude Bernard – LYON 1**

Président de l'Université	M. Frédéric FLEURY
Président du Conseil Académique	M. Hamda BEN HADID
Vice-Président du Conseil d'Administration	M. Didier REVEL
Vice-Président du Conseil des Etudes et de la Vie Universitaire	M. Philippe CHEVALLIER
Vice-Président de la Commission de Recherche	M. Petru MIRONESCU
Directeur Général des Services	M. Pierre ROLLAND

## **COMPOSANTES SANTE**

Département de Formation et Centre de Recherche en Biologie Humaine	Directrice : Mme Anne-Marie SCHOTT
Faculté d'Odontologie	Doyenne : Mme Dominique SEUX
Faculté de Médecine et Maïeutique Lyon Sud - Charles Mérieux	Doyenne : Mme Carole BURILLON
Faculté de Médecine Lyon-Est	Doyen : M. Gilles RODE
Institut des Sciences et Techniques de la Réadaptation (ISTR)	Directeur : M. Xavier PERROT
Institut des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques (ISBP)	Directrice : Mme Christine VINCIGUERRA

## **COMPOSANTES & DEPARTEMENTS DE SCIENCES & TECHNOLOGIE**

Département Génie Electrique et des Procédés (GEP)	Directrice : Mme Rosaria FERRIGNO
Département Informatique	Directeur : M. Behzad SHARIAT
Département Mécanique	Directeur M. Marc BUFFAT
Ecole Supérieure de Chimie, Physique, Electronique (CPE Lyon)	Directeur : Gérard PIGNAULT
Institut de Science Financière et d'Assurances (ISFA)	Directeur : M. Nicolas LEBOISNE
Institut National du Professorat et de l'Education	Administrateur Provisoire : M. Pierre CHAREYRON
Institut Universitaire de Technologie de Lyon 1	Directeur : M. Christophe VITON
Observatoire de Lyon	Directrice : Mme Isabelle DANIEL
Polytechnique Lyon	Directeur : Emmanuel PERRIN
UFR Biosciences	Administratrice provisoire : Mme Kathrin GIESELER
UFR des Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives (STAPS)	Directeur : M. Yannick VANPOULLE
UFR Faculté des Sciences	Directeur : M. Bruno ANDRIOLETTI



## Remerciements

*Je tiens dans un premier temps à remercier ma directrice de thèse, Dre Jocelyne Ventre-Dominey, pour m'avoir proposé ce projet de thèse, pour la très grande qualité de son encadrement, pour son aide dans mon organisation au travail, et pour la richesse des discussions théoriques. Je tiens également à remercier Dr Peter Ford Dominey pour son implication dans mon projet de thèse. J'ai pu grâce à lui beaucoup apprendre et faire fonctionner les différents robots pour les expériences.*

*Je remercie également le Professeur Pierre Fournernet pour avoir présidé mon jury de thèse ainsi que le Professeur Yann Coello et la Professeure Adriana Tapus pour leur participation à ce jury ainsi que pour leur rapport de soutenance et la discussion théorique que j'ai pu avoir avec eux lors de ma soutenance de thèse.*

*Je remercie le Professeur Charalambos Papaxanthis de m'avoir accueilli ces deux dernières années dans son laboratoire Inserm U1093 Cognition, Action et Plasticité Sensorimotrice (CAPS) de Dijon ainsi que Dre Colette Dehay pour m'avoir accueilli dans son laboratoire Inserm U846 Stem Cell & Brain Research Institute (SBRI) de Bron, les deux années précédentes.*

*Je remercie aussi les membres du comité de suivi de thèse, à savoir le Dr Alessandro Farnè, le Dr Frédéric Lopez, le Professeur Francesco Pavani, le Professeur Thierry Pozzo, et le Dr Emmanuel Procyk.*

*Je remercie Messieurs Yves Ballay et Cyril Sirandré qui m'ont aidé pour la mise en place technique des derniers protocoles expérimentaux et pour avoir accès aux ressources logicielles nécessaires à mon travail.*

*Je remercie Élisabeth Montmartin, Virginie Cidda-Viola, Jeoffrey Maillard, Chandara Ney et Véronique Vezoli, qui m'ont aidé nombre de fois pour des démarches administratives de l'Inserm et de l'École Doctorale ED 476 Neurosciences et Cognition.*

*Je tiens aussi à remercier Clément, Carol et Nicolas que j'ai côtoyé et avec qui j'ai échangé tout du long de mon doctorat aussi bien au laboratoire SBRI qu'au CAPS.*

*Je remercie les doctorants, post-doctorants et enseignants-chercheurs de l'institut Marey I3M et du laboratoire CAPS que j'ai pu côtoyer durant mon séjour à Dijon.*

*Je remercie également l'École Doctorale ED 476 Neurosciences et Cognition, l'Université Claude Bernard Lyon 1, et l'Université Lumière Lyon 2 pour m'avoir permis de réaliser ce cursus.*

*Je remercie toutes les autres personnes qui ont porté de l'intérêt à mon travail et qui ont assisté à ma soutenance de thèse.*

*Pour terminer, je remercie mes parents qui m'ont aidé et cru en moi tout du long de mes études, mon frère pour son soutien et ses encouragements, ainsi que mes proches.*



## Résumé

Cette thèse s'inscrit dans les développements récents de la théorie de l'incorporation appliqués à la cognition sociale qui défendent que la plasticité de la représentation du Soi induite par interaction multisensorielle peut s'étendre à notre relation à l'autre, et modifier notre ressenti envers autrui. L'utilisation d'une procédure inspirée des neurosciences pour téléporter des sujets humains dans des robots a permis d'induire, par interaction sensorimotrice, l'incorporation du sujet. Nous avons mis en évidence que la nature de la manipulation –des mouvements de tête sujet-robot synchrones ou des caresses simultanées des deux visages– module la plasticité de la représentation du Soi corporel évaluée à travers les modifications des sensations illusoire d'appartenance incluant l'appropriation du visage, de localisation et d'agentivité. Le mouvement volontaire induit une singularité via un fort sentiment d'agentivité alors que l'induction tactile produit une perception illusoire plus distribuée. Cette même modulation est aussi observée lors d'une perspective d'interaction homme-robot en face-à-face. Cette incorporation peut augmenter l'acceptabilité et la proximité sociale vis-à-vis du robot mais celle-ci ne suffit pas : elle dépend de la nature de la manipulation sensorielle. Uniquement les manipulations motrices renforcent la sympathie et l'affinité du sujet envers le robot, les deux étant corrélées positivement au sentiment d'agentivité. Ces résultats suggèrent des mécanismes dissociés sous-jacents à l'incorporation en termes d'agentivité. Ainsi, la résonance intentionnelle lors de mouvements simultanés entre l'homme et le robot pourrait être responsable de sentiments accrus de proximité sociale et émotionnelle envers le robot. Remarquablement, la sensation d'incorporation et les sentiments sociaux induits associés sont indépendants de l'apparence humanoïde ou non du robot.



## Abstract

This thesis is situated in the context of recent developments in the theory of embodiment applied to social cognition that argue that the plasticity of the bodily self-representation induced by multisensory interactions can extend to our relationship to others, and change how we feel about them. In this work, we used a simple neuroscience-inspired procedure to beam our human subjects into a robot, allowing embodiment induced by multisensory interactions. We highlight that the nature of the multi-sensory manipulation, i.e. correlated participant and robot's head movements or simultaneous strokes of the participant and robot's faces, modulates the plasticity of the bodily self-representation evaluated through the modifications of the senses of body-ownership, enfacement, self-location and agency. Voluntary movement induces a singularity via a strong sense of agency, while tactile induction of the robotic incorporation yields a more distributed illusive perception. This is also observed during the human-robot face-to-face interaction perspective. Although this incorporation can increase social acceptability and closeness to the robot, it is not sufficient, and depends on the nature of the multi-sensory manipulation. Only visuo-motor manipulations reinforce the likeability and closeness of the subject towards the robot, both positively correlated with agency. These results are suggestive of dissociated mechanisms underlying embodiment particularly in term of agency. Thus, the intentional resonance evoked during correlated movements between human and robot is responsible for an increased feeling of social and emotional proximity toward the robot. Remarkably, the beaming experience and the corresponding sense of embodiment and social proximity are independent of robots' humanoid appearance.



## Table des matières

<b>Introduction générale .....</b>	<b>13</b>
<b>Chapitre 1 : Contexte théorique .....</b>	<b>17</b>
1. Le Soi : l'Individu avec lui-même.....	17
2. Le Soi et l'Autre : cognition sociale.....	51
3. Soi-Autruï et les Espaces personnels .....	58
4. Téléprésence et interaction robotique .....	66
5. Objectifs .....	69
<b>Chapitre 2 : Techniques de robotique.....</b>	<b>73</b>
1. Description du matériel robotique.....	73
2. Principe de la plateforme SWoOZ .....	77
<b>Chapitre 3 : Expériences Visuo-Motrices .....</b>	<b>85</b>
1. Expérience 1 (TéléVM : Synchrones vs Statique).....	86
2. Expérience 2 (TéléVM : Synchrones vs Asynchrones).....	111
3. Expérience 3 (FaceVM : Synchrones vs Asynchrones) .....	123
<b>Chapitre 4 : Expériences Visuo-Tactiles.....</b>	<b>135</b>
1. Expérience 4 (TéléVT : Synchrones vs Asynchrones).....	136
2. Expérience 5 (FaceVT : Synchrones vs Asynchrones) .....	151
<b>Chapitre 5 : Comparaisons inter-expérience.....</b>	<b>163</b>
1. Analyse statistique des données .....	163
2. Résultats de l'analyse statistique.....	164
3. Synthèse des résultats .....	169
<b>Chapitre 6 : Expérience Espaces-Pointage .....</b>	<b>171</b>
1. Objectif et hypothèses .....	172
2. Matériel et méthodes .....	172
3. Le protocole expérimental.....	175

4.	Analyse statistique des données .....	182
5.	Résultats préliminaires .....	183
6.	Synthèse .....	187
<b>Chapitre 7 : Discussion .....</b>		<b>189</b>
1.	<b>Incorporation et représentation de soi .....</b>	<b>191</b>
2.	<b>Représentation de Soi, cognition sociale et acceptabilité des robots .....</b>	<b>199</b>
3.	<b>Sensation illusoire d’Incorporation et sa mesure .....</b>	<b>204</b>
4.	<b>L’apparence et la morphologie des robots en question .....</b>	<b>208</b>
5.	<b>Synthèse et perspective .....</b>	<b>210</b>
BIBLIOGRAPHIE.....		215

## Introduction générale

Actuellement au cœur de la quatrième révolution industrielle, les robots sociaux passent résolument de la fiction à la réalité. La perspective d'interagir avec ces « robots sociaux » dans notre vie quotidienne se profile à l'horizon. Pourtant, nous savons peu de choses sur la façon dont nous percevons, interagissons ou acceptons ces agents artificiels dans des contextes sociaux et, dans quelle mesure, le cerveau humain les intègre dans notre milieu social. En conséquence, des questions importantes émergent concernant la flexibilité et l'adaptabilité de la cognition sociale humaine lors de la perception et l'interaction avec ces agents artificiels. Plusieurs défis ont été relevés lors de la construction de robots qui opèrent aujourd'hui dans des contextes quotidiens dont, notamment, la définition des caractéristiques qui peuvent rendre le robot accepté socialement par les humains. Les récits de science-fiction et la recherche en neurosciences cognitives ont inspiré des développements technologiques fondés sur la similitude des caractéristiques perçues entre robots et humains. Des détails anthropomorphiques ont ainsi été introduits dans le corps et le visage des robots et des avatars virtuels, y compris des détails dynamiques tels que des changements de couleur dans la zone du visage pour simuler des rougeurs liées aux réactions émotionnelles (Jimenez *et al.*, 2010).

Les recherches récentes en neurosciences cognitives exploitant les mécanismes cognitifs sous-jacents à l'incorporation suggèrent cependant une approche différente et encore relativement inexplorée de l'acceptation sociale des robots. En effet, les interfaces homme-machine progressent si rapidement qu'elles sont devenues un outil unique pour sonder la cognition humaine et ses mécanismes neuronaux sous-jacents. Ainsi, la téléprésence robotique permet d'étudier les processus adaptatifs entre les humains, les robots, et l'environnement, ce qui est intéressant pour de nombreux domaines théorique et appliqué ; un des grands défis étant l'étude de l'incorporation et de la cognition incarnée et, avec elle, la plasticité du soi corporel (Apps & Tsakiris, 2014; Blanke, 2012). Le sentiment d'incorporation, c'est-à-dire ressentir que notre corps nous appartient et que nous le contrôlons, est un aspect clé de la représentation du soi corporel. Étudier de quelle manière et sous quelles conditions un humain s'incorpore dans un robot peut nous informer sur les mécanismes de base de l'incorporation. Ce sont des concepts difficiles à aborder par ailleurs, puisque nous ne pouvons échapper à la présence permanente de notre corps, qui paradoxalement, se caractérise aussi par son absence (Leder, 1990). Les développements récents de la théorie de l'incorporation appliqués à la cognition sociale

défendent que la plasticité de la représentation du soi induite par interactions multisensorielles peut s'étendre à notre relation à l'autre, et ainsi modifier notre ressenti envers autrui.

Qu'est-ce que le soi corporel ? Comment étudier un phénomène qui n'est accessible qu'à l'individu qui l'expérimente ? Quelles sont les bases cérébrales des différents processus sous-jacents de la représentation de soi ? Quelle est le lien entre le soi et les processus liés à la cognition sociale et à la théorie de l'esprit –notre aptitude à nous représenter les autres, leurs intentions, leurs actions et à interagir avec eux ? (Hazem, 2018). Au-delà de l'espace corporel, l'espace péripersonnel – une représentation hautement plastique qui intègre des stimuli tactiles et visuels présentés sur et près du corps– peut aussi éclairer notre relation à nous-mêmes et aux autres. Comment s'articulent les frontières du corps, le domaine du soi et le domaine des autres ? Dans le premier chapitre de cette thèse, dédié au contexte théorique, nous aborderons ces problématiques et nous verrons comment la notion du soi corporel est devenue un objet d'étude de premier plan en neurosciences cognitives. Un aperçu des avancées sur la compréhension de la représentation de soi sera présenté notamment à travers les expériences fondatrices qui les ont permises, expériences comportementales visant à induire l'illusion d'incorporation d'une partie artificielle ou virtuelle du corps par manipulations sensorimotrices adaptées du paradigme de l'illusion de la main en caoutchouc de Botvinick et Cohen (1998). Des paramètres cruciaux pour certains aspects du sentiment d'incorporation, tels que le sentiment d'appartenance du corps et le sentiment d'agentivité, ont pu être identifiés. Mais, de nombreuses questions sur les mécanismes cognitifs sous-jacents et leur relation restent en suspens.

Dans ce travail, l'utilisation d'une procédure –dite de téléprésence robotique– pour téléporter des sujets humains dans des robots a permis d'induire par interactions multisensorielles l'incorporation dans un robot. Différentes interactions sensorielles, visuo-motrice ou visuo-tactile, et différentes perspectives expérimentales, téléprésence robotique ou interaction face-à-face homme-robot, seront explorées. Sur la base de récents travaux, l'objectif est de tester l'émergence d'un sentiment d'incorporation dans le robot en manipulant à la fois la nature de l'information multisensorielle et la perspective expérimentale mais aussi la possible concomitance d'une plus grande acceptabilité du robot. Les différentes modalités sensorimotrices d'induction et d'incorporation mises en œuvre, la synchronie de l'induction, l'apparence du robot et la perspective expérimentale — en immersion dans le robot et se voir

en tant que robot ou faire face au robot--sont autant de paramètres qui seront sources d'information.

Le chapitre 2 décrit le principe de téléprésence robotique. Cette technique fait référence à une méthode d'incorporation dans un robot via un dispositif de réalité virtuelle. Cela permet de voir à travers les yeux du robot, et ainsi de diriger son regard dans un environnement éloigné et de voir la scène visuelle dynamique correspondante en trois dimensions. Le principe de la téléprésence robotique est au cœur des protocoles expérimentaux développés dans les chapitres suivants.

Les expériences subjectives permettant d'évaluer le sentiment d'incorporation et les sentiments sociaux ressentis envers deux robots, humanoïde et non-humoïde, sont décrites dans les chapitres 3 et 4. Le chapitre 3 décrit les expériences dans lesquelles l'incorporation est induite par manipulations visuo-motrices et le chapitre 4, celles par manipulations visuo-tactiles.

Le chapitre 5 présente le développement de mesures objectives de l'espace péripersonnel et du schéma interne corporel –parties intégrantes de la représentation du soi corporel– en situation de téléprésence robotique afin de notamment pouvoir les corrélérer aux mesures subjectives d'incorporation.

Ce travail se termine par un dernier chapitre présentant une discussion de l'ensemble des résultats obtenus.



# Chapitre 1 : Contexte théorique

Le corps est un des fondements de la conscience de soi. Depuis quelques décennies, le développement de nouveaux paradigmes en neurosciences a permis de montrer qu'il est possible de percevoir notre corps autrement lorsque les informations sensorielles que nous percevons ou nos croyances sont modifiées, lors d'illusions ou de séances d'hypnose par exemple. Ces « manipulations » des représentations corporelles construites par le cerveau ont fait progresser nos connaissances sur le soi en tant qu'individu avec lui-même mais aussi dans notre interaction avec les autres. De part notamment leurs performances sur la temporalité et la rétroaction, les développements récents en téléprésence robotique ouvrent une nouvelle fenêtre d'étude sur la cognition incarnée et plus précisément sur la représentation du soi en isolation ou en interaction avec autrui.

## 1. Le Soi : l'Individu avec lui-même

Au cœur de la cognition humaine et impliquant une approche phénoménologique, l'étude du soi fait référence au concept de soi incluant la conscience, le sens, et la représentation de soi. Cet objet d'investigation fait appel à la démarche scientifique car il implique des recherches sur notamment la mémoire autobiographique, la mémoire prospective, et la perception du temps. Communément, le soi est catégorisé sous plusieurs formes chacune ayant ses propres caractéristiques ; le « soi minimal » et le « soi narratif » (Gallagher, 2000). Ce concept théorique du soi, divisé en plusieurs formes, a été initialement proposé par William James en 1890 (James, 1980) et illustré par un modèle théorique dans lequel il distingue principalement le « soi-objet » et le « soi-agent ». Le « soi objet », « soi corporel », « soi minimal » ou encore « I-Self » est de nature phénoménologique : il permet entre autres de répondre à la question « Quel est mon vécu ? ». Il correspond à un ensemble de processus causals qui contrôlent la réalisation et la conscience des expériences, des pensées, et des actes. Cette forme du soi au sens subjectif se construit à partir des afférences intéroceptives notamment les informations physiologiques (signaux gastriques, température, rythmes cardiaques et respiratoires), sensorielles, et proprioceptives (Gallagher, 2000). Le « soi agent »,

« soi empirique », « soi narratif » ou « Me-Self » est le soi objectif de la connaissance et de la représentation de soi. Source d'autoréflexivité et d'introspection (Nots, 2013), il fait appel à la mémoire autobiographique. C'est le soi à la base de l'identité personnelle qui se construit par la somme de nos pensées et états mentaux dans un continuum temporel. Il permet de répondre à la question « Qui-suis-je ? ». Cette forme du soi repose sur une construction autobiographique et permet de générer les sentiments d'identité, de continuité dans le temps.

## 1.1. *Le soi corporel : aspects généraux*

### 1.1.1. **Représentation du soi corporel**

La représentation du soi corporel est un ensemble qui englobe l'image du corps, plus largement l'image de soi dans sa globalité ainsi que le sens de l'identité. Cette représentation se situe au carrefour des expériences corporelles et relationnelles. Le corps joue un rôle central dans la construction de cette représentation, dans la mesure où il est l'objet avec lequel nous percevons les diverses sources d'informations sensorielles externes provenant de l'environnement. Le corps est, en plus de cela, l'objet au travers duquel nous recevons une part importante des informations internes, proprioceptives, et intéroceptives. La perception du flux d'informations internes de notre corps, à la différence du flux d'informations provenant de l'environnement externe, est continue. L'expérience corporelle est complexe, elle diffère selon si elle fait appel au champ de notre corps à proprement parler, à notre représentation corporelle, ou encore à notre conscience. Le champ de notre conscience se focalise sur ce que nous faisons, plus largement sur notre environnement, et, seulement dans un second temps, sur notre corps avec lequel pourtant nous interagissons (Leder, 1990, de Vignemont 2016). Par ailleurs, nous ne nous sentons jamais désincarnés dans la mesure où nous avons conscience de notre corps en permanence. « Nous avons une conscience directe et immédiate de notre corps, du moins à la marge, à tout moment, en toutes circonstances et n'importe où nous nous trouvons. » (de Vignemont, 2017 ; Gurwitsch, 1985).

De Vignemont explore la phénoménologie du corps propre en dépeignant les différentes sortes de sensations et sentiments corporels, soulignant que l'accès à notre propre corps est intrinsèquement autre que celui qu'il est possible d'appréhender pour le corps d'autrui. Cet accès singulier s'appuie sur les différentes informations sensorielles ; le toucher, l'équilibriception ou sens vestibulaire, la proprioception, la nociception –réaction des récepteurs sensitifs provoquée par des stimulus qui menacent l'intégrité de l'organisme–, et

l'intéroception –qui maintient l'équilibre homéostatique– (de Vignemont, 2011). Généralement, les signaux intéroceptifs n'atteignent pas le seuil de la conscience. De Vignemont met en parallèle la nature perceptive des sensations corporelles et la nature fondamentale des sentiments corporels. Les sensations corporelles expriment l'état du corps (sa température, sa position, ses mouvements, etc.). Elles changent constamment selon les informations envoyées par les récepteurs sensoriels. C'est en ressentant des sensations corporelles dans notre corps que nous prenons conscience de sa réalité. Différemment des sensations corporelles d'un instant donné, les sentiments corporels traduisent l'état fondamental du corps : le sentiment de présence corporelle, le sentiment des capacités corporelles au préalable de toute action, et le sentiment d'appartenance ou « *ownership* » (de Vignemont, 2017).

Deux grandes théories sous-tendent la philosophie du corps propre. Ces théories mettent toutes deux l'accent sur l'importance de la conscience corporelle. L'approche phénoménologique (Husserl, 1913 ; Merleau-Ponty, 1945) met l'action au cœur de la conscience du corps tandis que l'approche analytique décrit la conscience du corps en termes représentationnels (O'Shaughnessy, 1980 ; de Vignemont, 2011). Cette dernière approche est dominante en science expérimentale (par exemple, Tsakiris, 2010).

Selon Husserl (1913), tout type d'expérience peut être étudiée selon un processus de réflexion dit d'« attitude phénoménologique », il suffit d'en être conscient et de focaliser notre attention sur chaque détail et ce, en faisant abstraction de notre représentation du monde que nous tenons pour acquis. Cette démarche implique une réflexion et un regard sur les phénomènes mentaux et corporels internes, en eux-mêmes et à chaque instant. Un aspect inhérent de cette attitude phénoménologique est le concept d'intentionnalité de la conscience, l'idée que la conscience est toujours conscience de quelque chose. Ainsi, c'est « l'intentionnalité de la conscience » qui fait le lien entre les processus mentaux et le corps sur lequel l'attention est focalisée. Dans le sillage de Husserl, Merleau-Ponty souligne que c'est notre corps qui nous permet de percevoir le monde et de nous y investir. C'est par conséquent le lien entre corps et conscience qui est à la base de la perception. Ce lien aboutit à une conception nouvelle du soi, le soi incarné, tel qu'il sera développé ultérieurement par les philosophes phénoménologues, comme notamment Gallagher (2005), et par les neuroscientifiques comme par exemple Tsakiris (2010) et Varela (1999). Merleau-Ponty écrira « La conscience est originairement non pas un « je pense » mais un « je peux » » (Merleau-Ponty, 1945), plaçant ainsi l'action au cœur de la conscience corporelle en développant le

concept d'intentionnalité motrice. Dans cette approche énaïviste, nos expériences conscientes ne sont pas dissociables de nos actions corporelles ou de nos attentes sensorimotrices. Nos sensations sont intimement liées à notre capacité à déceler les relations partagées entre les entrées sensorielles et les sorties motrices.

La seconde approche dite représentationnaliste s'appuie dans un premier temps sur l'organisation spatiale des sensations corporelles. De multiples sources d'informations utilisant aussi bien la proprioception que le toucher, la vision ou l'action permettent d'élaborer une carte du corps, constituant ainsi un socle référent commun à toutes nos expériences corporelles (O'Shaughnessy, 1980 ; de ). La représentation corporelle du soi s'adapte aisément aux changements corporels, à long-terme lors de la croissance de l'enfant, mais aussi à court-terme lorsque, par exemple, la représentation de l'espace de préhension s'allonge lors de la manipulation d'outils dans le prolongement du bras. La sensation du sol au bout d'une canne par l'aveugle résulte d'un même type de processus ; la canne a été intégrée à la représentation du corps. Cette représentation du corps est en fait une structure interne dont le rôle est de décrire l'état du corps se situant à un très haut niveau d'intégration. Elle est différente de son équivalent cortical, au niveau du cortex somatosensoriel primaire et du cortex moteur primaire, recevant les informations somatosensorielles et organisé de manière somatotopique telle une image déformée du corps, comme un « Homoncule » (Penfield et Rasmussen, 1937) aux mains et au visage surdéveloppés (de Vignemont, 2017). Alors que l'Homoncule n'intègre pas la liaison entre les différentes parties du corps, la représentation corporelle du soi, elle, joue un rôle déterminant dans l'articulation entre nos sensations corporelles et nos actions. Sur la base de cette approche représentationnaliste, plusieurs auteurs (Gallagher, 2000 ; Paillard, 1999 ; Sirigu *et al.*, 1991) ont proposé une diversité de représentations avec chacune des caractéristiques propres et dont les déficits induiraient différentes pathologies.

### 1.1.2. Développement du soi corporel et modèle interne

Ainsi, le corps peut être vu sous différents angles (sémantique, émotionnel, spatial, moteur, tactile, visuel, proprioceptif, etc.) et décrit en termes de caractéristiques antinomiques (*e.g.*, conscient/inconscient, conceptuel/non-conceptuel, dynamique/statique, inné/acquis). Les neurosciences ont historiquement différencié deux représentations du corps multimodales différentes, le schéma corporel en partie inconscient et l'image corporelle consciente et sémantique. Le schéma corporel est l'ensemble des processus essentiellement inconscients qui

autorisent les capacités sensorimotrices tout en les limitant. Le schéma corporel participe au processus de structuration de la conscience mais il n'apparaît pas explicitement dans le contenu de la conscience. L'image du corps est une représentation interne complexe qui se construit et se modifie de manière plus ou moins consciente au cours du temps, et ce, au travers des perceptions, souvenirs, émotions, attitudes et croyances relatives au corps. L'existence d'une telle dualité de la représentation corporelle est suggérée par les observations cliniques chez des patients neurologiques (par exemple. Shallice 1988 ; McCarthy & Warrington, 1990). Ainsi, chez des patients atteints de désordres corporels relevant de lésions cérébrales, les dissociations fonctionnelles rapportées suggèrent l'existence de deux composantes distinctes dans la représentation du soi corporel, image et schéma corporels pouvant être indépendamment sollicités. Ainsi une atteinte du schéma corporel est observée chez des patients privés d'afférences proprioceptives ou patients apraxiques (Buxbaum & Coslett, 2001) alors qu'une atteinte de l'image corporelle est observée chez des patients atteints d'autopagnosie<sup>1</sup> (Gallagher, 2005).

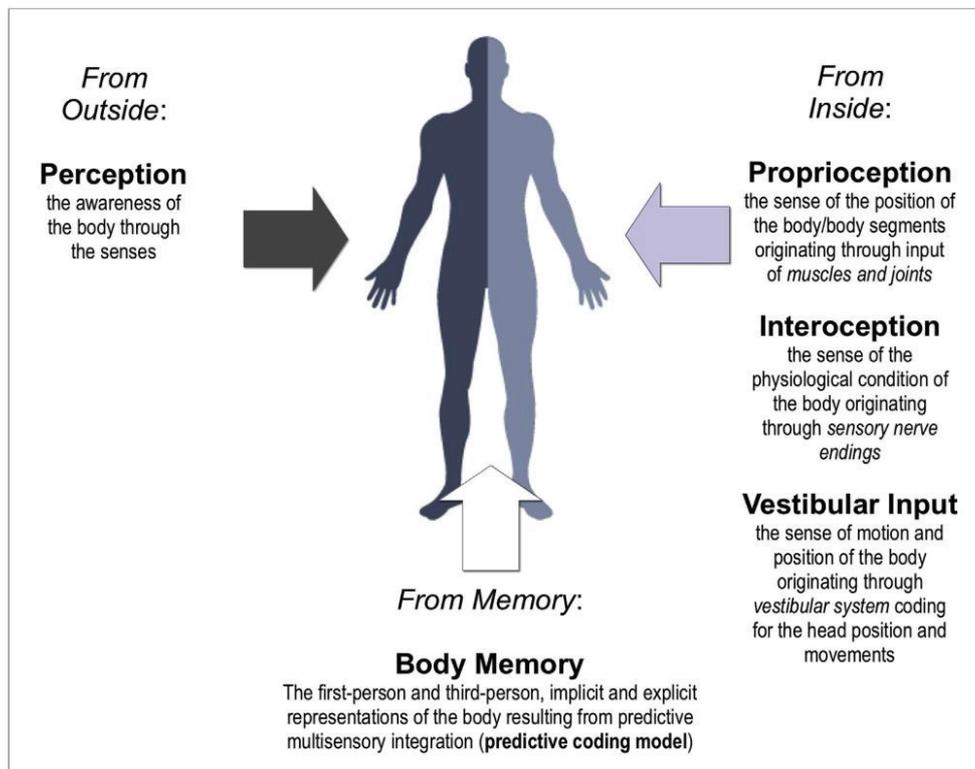
Dans ce contexte, l'intégration des informations sensorielles provenant du corps et de l'environnement joue un rôle primordial dans la construction de la représentation de notre propre corps ainsi que dans ses relations avec l'environnement. Pour créer une représentation précise du corps dans l'espace, le schéma corporel intègre à la fois des informations sensorielles générées par le corps en mouvement via la transmission d'afférences sensorielles –i.e. vestibulaires, visuelles et proprioceptives– et des informations motrices relatives à la planification, l'exécution et le contrôle du mouvement. L'intégration de ces différentes informations produites lors de l'action permettrait chez l'adulte une mise à jour continue du schéma corporel (Head & Holmes, 1911 ; Maravita *et al.*, 2003).

S'appuyant sur les données récentes en neuropsychologie, neuroscience et psychologie cognitive sur la mémoire corporelle, G. Riva (2018) décrit l'origine des représentations du corps humain pour élucider leur processus de développement et, en particulier, leur relation avec des concepts plus explicites de soi. Cet auteur propose un modèle incluant les différentes étapes du développement depuis l'enfance (Riva, 2018). Selon ce modèle, notre expérience corporelle n'est pas directe. Médiée par l'information perceptive, elle est influencée par

---

<sup>1</sup> Incapacité à pointer ou nommer les différentes parties du corps

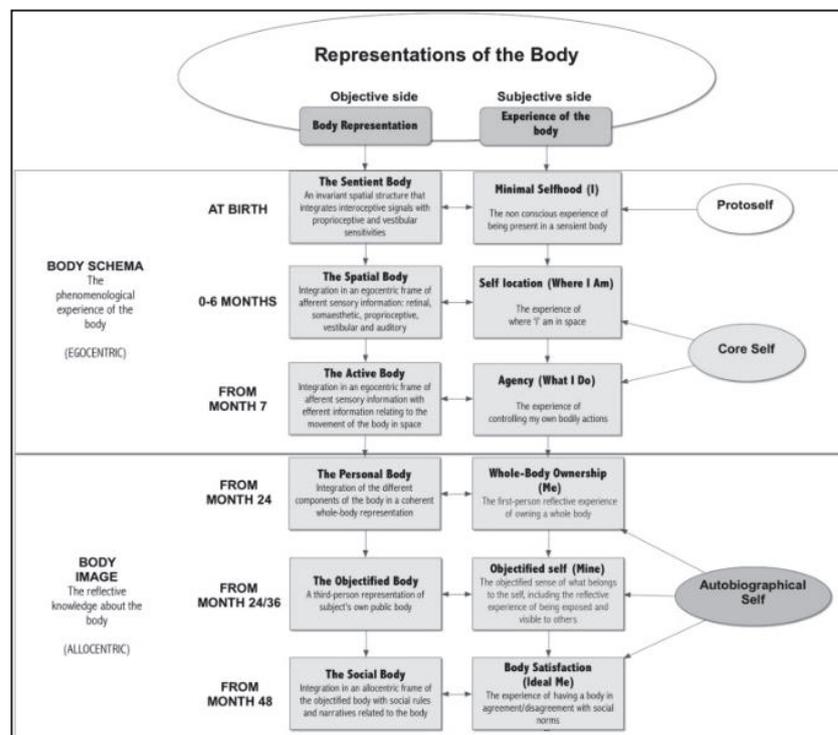
l'information interne et recalibrée par les représentations corporelles implicite et explicite stockées (mémoire corporelle) (Figure 1-1).



**Figure 1-1 : L'expérience corporelle.** (Figure reproduite de Riva, G. (2018). *The neuroscience of body memory: From the self through the space to the others*. *Cortex: A Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 104, p 242).

Au cours du développement, la représentation corporelle se construit en six étapes, intégrant à la fois des données externes (perception, environnement, culture) mais aussi des données internes (schéma, image et mémoire corporelle) (Figure 1-2). Le schéma corporel se construit d'abord selon un référentiel egocentrique. Dès la naissance, le corps expérimente les premières sensations. C'est l'émergence du « sentiment du corps » par intégration de signaux via les systèmes intéroceptifs, proprioceptifs et vestibulaires (Gallagher, 2005 ; Riva, 2018). Le corps est perçu comme dissocié de l'environnement externe, on parle alors de « soi minimal » (Blanke & Metzinger, 2009) ou « protoself » (Damasio, 1999). Durant les six premiers mois de sa vie, le nourrisson enrichit ses représentations en intégrant de nouvelles informations sensorielles (vision, proprioception, équilibre, audition) (Giummarra *et al.*, 2008 ; Maselli, 2015 ; Riva, 2014 ; Slaughter & Brownell, 2012). Le schéma corporel ainsi développé permet de localiser, de reconnaître, et d'actualiser les intentions motrices afin de pouvoir interagir avec les objets de l'environnement (Decety & Sommerville, 2003). L'agentivité, que l'on peut

définir en partie comme le sentiment de contrôle du corps, émerge à partir du septième mois de la vie du nourrisson, capable alors de percevoir les imprévus spatio-temporels. C'est le développement du « corps actif ». (Kammers *et al.*, 2009). Le schéma corporel évolue vers l'image corporelle, avec la connaissance du soi corporel dans un référentiel allocentrique. Ainsi, entre 24 et 48 mois après la naissance, l'enfant développe un concept de corps personnel qui correspond à une connaissance incarnée et élaborée de chaque partie de son corps et de leurs propriétés (Riva, 2014 ; Rochat, 2010), c'est l'émergence du sentiment d'appartenance du corps –*body ownership*–, du « Moi ». Plus tard viendra le corps objectivé une expérience réflexive du corps qui correspond à la projection des connaissances des parties du corps et des actions d'autrui sur soi-même. On parle du « soi objectif » ou « mien » pour signifier le sentiment d'appartenance du corps et la conscience d'être perçu par autrui (Rochat, 2012). Finalement, le corps social intègre les règles sociales et les schémas narratifs liés aux propriétés du corps objectivé. Il en résulte une expérience de « satisfaction corporelle » et l'émergence du « moi idéal » en adéquation avec les normes sociales connues. Le corps devient un objet que l'on peut faire évoluer et projeter dans le temps (Shilling, 2012). Ces six niveaux de représentation interne sont intégrés dans une matrice du corps sur laquelle repose la représentation interne du soi corporel.



**Figure 1-2 : Évolution de la représentation corporelle :** (Figure reproduite de Riva, G. (2018). *The neuroscience of body memory: From the self through the space to the others. Cortex: A Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 104, p 244).

### 1.1.3. Le paradigme de l'illusion de la main en caoutchouc

#### a. Concepts d'appartenance et d'agentivité

La phénoménologie du corps propre ne peut pas être étudiée comme celle des autres objets dans le monde compte tenu de sa permanence « *qui n'est pas une permanence au monde mais une permanence de mon côté* » (Merleau-Ponty, 1945). En effet, nous tenons usuellement pour acquis que nous possédons un corps et que nous sommes des agents, agissant sur le monde. Ce sentiment d'appartenance décrit le sentiment de centrage sur soi que nous percevons à l'égard de nos parties du corps, sentiments ou pensées (Gallagher, 2000), tandis que le sentiment d'agentivité se réfère à l'expérience d'initier et de contrôler une action (Moore & Fletcher, 2012). Bien que dans la plupart des situations de la vie quotidienne nous n'y portons pas attention, les deux aspects clés de la représentation de soi que sont le sentiment d'agentivité et le sentiment d'appartenance jouent un rôle fondamental (Blanke & Metzinger, 2009), sinon indispensable (Gallagher, 2000 ; Riva, 2018) dans toute expérience de soi.

Le sentiment d'appartenance se différencie du sentiment d'identité que l'on peut avoir en se regardant dans un miroir. Par exemple, en regardant ses propres mains, on reconnaît immédiatement à qui elles appartiennent. On sent automatiquement que ces extrémités font partie de notre propre corps sans avoir à y penser activement. La distinction perceptuelle entre ce qui fait partie du corps et ce qui ne l'est pas est essentielle à la survie et donc fondamentale pour la perception humaine, l'action et la cognition. De plus, le sens de son propre corps est la pièce maîtresse de l'expérience consciente humaine parce que c'est à partir du point de vue du soi corporel qu'une personne devient consciente de son environnement (Ehrsson, 2020). Le sentiment d'appartenance est la conscience de ce que je suis, de celui qui vit une expérience (Cebolla *et al.*, 2016) et dépend d'une intégration précise de l'information multisensorielle liée au corps en constante évolution (Gallagher, 2000). L'intégration multisensorielle des signaux corporels fait référence à la capacité du cerveau à combiner des informations provenant de différentes modalités sensorielles pour fournir une perception stable et cohérente du corps et de son environnement. Ces données sensorielles sont pesées et intégrées en fonction de leur fiabilité sachant que la source d'information sensorielle qui varie le moins est la source d'information la plus fiable (Holmes & Spence, 2005). De nombreuses disciplines dont la phénoménologie, la philosophie de l'esprit et les neurosciences cognitives (Tsakiris & Critchley, 2016 ; de Vignemont, 2011) ont abordées la question de l'émergence du sentiment d'appartenance. La plupart des théories neurocognitives sur le sentiment d'appartenance et les représentations internes se situent entre des approches ascendantes (*bottom-up*) et descendantes

(*top-down*). Alors que les contributions ascendantes supposent que le sentiment d'appartenance dépend principalement de l'intégration multisensorielle et seulement marginalement de représentations internes du corps, les contributions descendantes font l'hypothèse d'une forte contribution des représentations internes corporelles.

Le sentiment d'appartenance est souvent corrélé au sentiment d'agentivité qui, rappelons-le, est la conscience que je suis celui qui est l'initiateur ou la source de l'action (Cebolla *et al.*, 2016). En effet, dans de nombreuses situations de la vie quotidienne, nous expérimentons le sentiment d'appartenance et le sentiment d'agentivité simultanément (Braun *et al.*, 2018, pour une revue). Par exemple, si je lève ma jambe, alors je fais l'expérience non seulement du sentiment d'appartenance de ma jambe, mais aussi du sentiment d'agentivité pour le mouvement de celle-ci. Ce sentiment d'agentivité permet aux individus de distinguer les actions générées par eux-mêmes des actions produites par autrui. (Balconi, 2010). Il repose sur une différenciation préalable entre soi et l'autre (de Vignemont & Fournieret, 2004). Ce sens fondamental de l'action provient des processus sensorimoteurs, car il dépend d'un lien de causalité entre une action et les conséquences sensorielles de celle-ci (Synofzik, 2008). Par conséquent, le sentiment d'agentivité –la conscience de soi à travers nos actes et plus précisément à travers le vécu que nous en avons– renvoie au fait de vivre nos actions et nos pensées comme étant nôtres mais aussi au sentiment de les causer volontairement et de les contrôler.

#### **b. L'expérience de « l'illusion de la main en caoutchouc »**

Une expérience fondatrice appelée « l'illusion de la main en caoutchouc » mise en place par Botvinick et Cohen en 1998 a initiée l'investigation expérimentale de la représentation du soi corporel. Ce paradigme est basé sur l'illusion d'incorporer et de s'approprier un objet externe, illusion induite par manipulations de la perspective visuelle associée à des inductions sensorielles corrélées appelées congruence multisensorielle. En situation expérimentale, un sujet est assis avec sa main gauche placée hors de son champ visuel et voit, à la place naturelle que sa main aurait dû occuper, une main en caoutchouc. La Figure 1-3, issue du livre « *The Ego Tunnel: The Science of the Mind and the Myth of the Self* » de Thomas Metzinger en 2009, illustre ce paradigme. Un expérimentateur stimule avec un pinceau simultanément les deux mains, la main en caoutchouc et la main du sujet. La stimulation tactile synchrone de la main factice –vu par le sujet– et de sa propre main –non visible par le sujet– (voir Figure 1-3) crée

chez le sujet l'illusion que la main artificielle lui appartient. Il fait ainsi l'expérience d'un déplacement proprioceptif : il authentifie de façon erronée la main factice à une partie de son corps. Le conflit entre les informations somatosensorielles et visuelles ébranle sa représentation du soi corporel.

À partir des résultats de tests psychométriques effectués au cours d'une expérience d'illusion de main en caoutchouc, Longo et ses collaborateurs (Longo *et al.*, 2008) ont analysé en composante principale les rapports subjectifs introspectifs. Ils ont montré que l'expérience subjective d'incorporation serait liée à trois composantes : l'appartenance du corps ou d'un membre du corps, la localisation de soi et l'agentivité. Ce sont les deux premières composantes, c'est-à-dire l'expérience subjective que ce corps est le nôtre (sentiment d'appartenance) et que nous sommes dans la même position que celle où se situe notre corps (sensation de localisation), qui sont perturbées par l'expérience d'illusion et permettent de prédire le déplacement proprioceptif vers la main factice suite à la stimulation tactile synchrone. La sensation que nous pouvons contrôler et bouger les membres de notre corps (sentiment d'agentivité) n'est par contre pas ou peu perturbée par l'illusion de main en caoutchouc : les participants n'ont pas la sensation de pouvoir contrôler et bouger la main factice (Nazem, 2018).

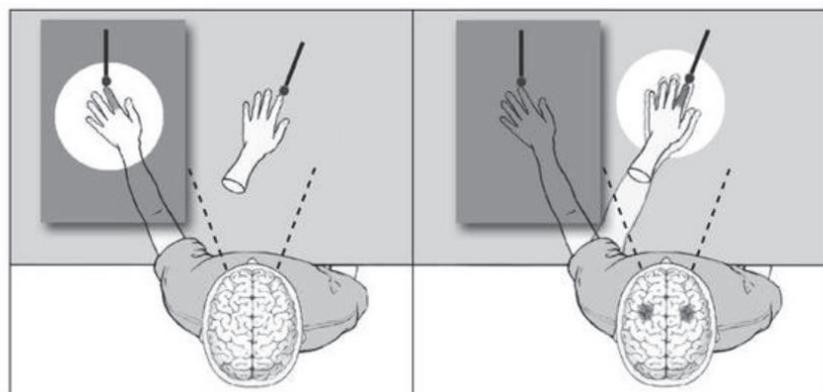


Figure 1-3 : **L'illusion de la main en caoutchouc. Le sujet observe une main humaine factice en caoutchouc tandis que sa propre main est cachée (rectangle gris).** La main cachée du participant et la main en caoutchouc sont caressées de façon répétée et synchrone avec un pinceau par un expérimentateur. Chez la plupart des participants, cela induit une sensation d'appartenance illusoire de la main en caoutchouc. Les zones sombres montrent des zones d'activité accrue dans le cerveau. Les zones claires du contour de la main et les zones sombres de l'index indiquent les champs réceptifs tactiles et visuels des neurones (Figure reproduite de Metzinger, T. (2009). *The ego tunnel: The science of the mind and the myth of the self*. Basic Books, p 4).

## 1.2. Manipulations du soi corporel et sensation d'incorporation

Au cours des dernières années, un nombre croissant d'études ont tenté de manipuler et d'étudier les aspects du soi minimal de manière empirique. Issue de l'adaptation du paradigme de l'illusion de la main en caoutchouc, ces manipulations sensorielles et motrices ont permis de préciser les caractéristiques et les règles qui sous-tendent l'incorporation et notamment les deux composantes clés que sont les sentiments d'appartenance et d'agentivité.

### 1.2.1. Caractéristiques du sentiment d'incorporation : appartenance et agentivité

#### a. Manipulations sensorielles

##### i. Manipulations d'une partie du corps

#### Mesures subjectives et objectives

Pour mesurer la dimension subjective de l'illusion de la main en caoutchouc, de nombreux auteurs ont adapté le questionnaire original utilisé par Botvinick et Cohen (1998) (Figure 1-4) à l'objectif particulier de leur étude (Longo et al, 2008 ; Farmer *et al.*, 2012 ; Schaefer *et al.*, 2013 ; etc.).

---	--	-	0	+	++	+++	
<input type="radio"/>	Q1: 'It seemed as if I were feeling the touch of the paintbrush in the location where the rubber hand was touched.'						
<input type="radio"/>	Q2: 'It seemed as though the touch I felt was caused by the paintbrush touching the rubber hand.'						
<input type="radio"/>	Q3: 'I felt as if the rubber hand were my hand.'						
<input type="radio"/>	Q4: 'It felt as if my (real) hand were drifting towards the right (towards the rubber hand).'						
<input type="radio"/>	Q5: 'It seemed as if I might have more than one left hand or arm.'						
<input type="radio"/>	Q6: 'It seemed as if the touch I was feeling came from somewhere between my own hand and the rubber hand.'						
<input type="radio"/>	Q7: 'It felt as if my (real) hand was turning rubbery.'						
<input type="radio"/>	Q8: 'It appeared (visually) as if the rubber hand were drifting towards the left (towards my own hand).'						
<input type="radio"/>	Q9: 'The rubber hand began to resemble my own (real) hand, in terms of shape, skin tone, freckles or some other feature.'						

**Figure 1-4 : Le questionnaire de Botvinick et Cohen composé de neuf items.** Les participants donnent leurs réponses sur une échelle visuelle de sept possibilités de fortement d'accord (++++) à fortement pas d'accord (---) (Figure reproduite de Botvinick, M., & Cohen, J. (1998). *Rubber hands 'feel' touch that eyes see. Nature, 391, p. 751*).

Différentes mesures comportementales ont été développées et la plus largement mise en œuvre est celle de la dérive proprioceptive qui consiste à mesurer la distance entre la position ressentie de la vraie main et la position de la main illusoire, avant et après l'expérience d'illusion de la main en caoutchouc. Différentes méthodes expérimentales ont été élaborées pour évaluer cette dérive proprioceptive. Citons, comme exemple, celle réalisée par Tsakiris et Haggard en 2005 dans laquelle les expérimentateurs ont demandé de rapporter la distance estimée par les participants entre leur propre main et la main artificielle, avant et après stimulation tactile. Les chercheurs ont démontré qu'après stimulation tactile, la distance estimée entre les deux mains était réduite comparativement à avant stimulation; et ceci uniquement lorsque la stimulation tactile des deux mains était synchrone. En condition asynchrone, la distance estimée par le participant restait inchangée par la manipulation, démontrant l'importance de la corrélation multi-sensorielle. Certaines études normalisent les scores obtenus à la longueur de bras du participant (Cowie *et al.*, 2013). Quand les participants expérimentent avec succès l'expérience d'illusion de la main en caoutchouc, une dérive proprioceptive est observée traduisant l'intensité de l'illusion. Une autre mesure objective comportementale de l'expérience d'illusion de la main en caoutchouc consiste à utiliser une tâche de congruence intermodale permettant une étude des processus multisensoriels pendant l'illusion. Ainsi, Zopf et ses collaborateurs (Zopf *et al.*, 2010) ont élaboré une tâche de congruence intermodale dans laquelle des cibles tactiles sont présentées sur la main réelle et des distracteurs visuels sur la main artificielle. De courtes vibrations tactiles sont appliquées à l'aide d'un pinceau à deux doigts différents (index et majeur, par exemple) de la main réelle du participant. Les participants doivent alors indiquer le doigt pour lequel ils ont ressenti une vibration tactile en appuyant sur un des deux boutons placés sous les mêmes doigts de leur autre main. Les distracteurs, des stimuli visuels –bref clignotement lumineux– situés au-dessus des doigts de la main en caoutchouc, apparaissent temporellement synchrones aux stimuli tactiles et spatialement congruents, i.e. sur le même doigt, ou non congruents, i.e. sur l'autre doigt. Les stimuli visuels spatialement congruents améliorent la localisation de la cible tactile comparativement aux stimuli visuels non congruents. L'effet de congruence intermodale, défini comme la différence des scores des essais congruents et non congruents, traduit l'influence de l'information visuelle sur la discrimination des emplacements des cibles tactiles tel un marqueur de l'interaction

multisensorielle. L'effet de congruence intermodale augmente significativement lorsque l'illusion est induite, comparativement à la mesure de contrôle (Zopf *et al.*, 2013).

Des mesures physiologiques sur les effets de l'expérimentation de l'illusion de la main en caoutchouc ont aussi été menées comme, par exemple, la mesure des variations de température de la peau ou encore la réponse de conductance cutanée de la peau lorsqu'une menace soudaine approchant la main en caoutchouc est perçue. Armel et Ramachandran (2003) ont constaté que les participants ont montré une réponse de conductance cutanée plus élevée lorsque, après l'induction de l'illusion, le doigt de la main en caoutchouc était plié en arrière. Bien que la manipulation n'ait affecté que la main en caoutchouc, les participants présentaient une élévation des scores de conductance cutanée en relation avec l'intensité de l'illusion, montrant une réponse physiologique à une menace perçue. Cette activation du système défensif a également été observée (Ehrsson *et al.*, 2008 ; Honma *et al.*, 2009) lors de situations d'agression. Les mesures de température de la main constituent également des indicateurs physiologiques associés à l'illusion de la main en caoutchouc (Moseley *et al.*, 2008 ; Thakkar *et al.*, 2011). La surveillance de la température cutanée est basée sur les résultats de Moseley et ses collaborateurs (2008) qui ont montré une diminution relative de la température cutanée de la main réelle d'environ 0,2°C à 0,8°C pendant l'induction de l'illusion de la main en caoutchouc par rapport à une condition témoin où l'illusion n'a pas été induite. Les auteurs ont conclu que l'illusion engage les processus homéostatiques de telle sorte que la température cutanée de la vraie main diminue lorsque les participants s'approprient la main en caoutchouc. D'une manière intéressante, Barnsley et ses collaborateurs (Barnsley *et al.*, 2011) ont observé une augmentation de la réactivité à l'histamine au niveau de la main du sujet due à une réponse du système immunitaire. Cette réaction immunitaire résulterait d'une forme de désappropriation de la main du sujet traitée alors comme un corps étranger.

Toutefois, les aspects de l'illusion de la main en caoutchouc évalués par ces mesures ne sont pas forcément corrélés. Par exemple, le sentiment illusoire d'appartenance de la main factice et la dérive proprioceptive se sont avérés dissociés par comparaison à deux conditions de contrôle (temporalité de l'induction tactile asynchrone ou seulement la vue de la main factice sans induction tactile) traduisant éventuellement la présence de deux processus distincts mis en jeu lors de l'expérimentation de l'illusion de la main en caoutchouc (Rohde *et al.*, 2011).

### Caractéristiques temporo-spatiales de l'illusion

Deux décennies de recherche comportementale sur l'illusion de la main en caoutchouc ont révélé plusieurs facteurs qui semblent déterminer si le sentiment d'appartenance illusoire d'une main peut être induit avec succès. L'un d'eux, mis en évidence par Botvinick et Cohen (Botvinick & Cohen, 1998), est la synchronie temporelle entre les stimulations tactiles vues et ressenties, condition fondamentale pour que l'illusion se produise. Les auteurs ont suggéré que l'illusion de la main en caoutchouc émerge d'une triple interaction entre vision, toucher et proprioception. Plusieurs auteurs ont développé cette suggestion en stipulant que le sentiment illusoire d'appartenance du corps repose sur l'intégration d'informations multisensorielles concomitantes liées au corps (Makin *et al.*, 2008 ; Tsakiris, 2010 ; Ehrsson, 2012). Par ailleurs, le traitement spatio-temporel des signaux multisensoriels implique deux règles. Le principe temporel de l'intégration multisensorielle stipule que si deux signaux sensoriels se produisent dans une courte fenêtre temporelle, ils sont susceptibles d'avoir été causés par le même événement externe. La nécessaire proximité temporelle des stimuli visuel et sensoriel lors de l'expérimentation de l'illusion a été précisée et évaluée à 500 ms, temps au-delà duquel la force de l'illusion –mesurée par questionnaire subjectif et dérive proprioceptive– est considérablement réduite (par exemple, Shimada *et al.*, 2014 ; Costantini *et al.*, 2016). La deuxième règle d'intégration multisensorielle fait référence à la localisation des signaux sensoriels les uns par rapport aux autres, le principe spatial. Il postule que deux stimuli ou plus doivent se produire au même endroit pour être attribués au même événement. Plusieurs auteurs (Gentile *et al.*, 2013 ; Limanowski & Blankenburg, 2013) ont testé l'effet de stimulations spatialement incongruentes où les informations visuelles et tactiles sont produites sur des zones cutanées anatomiquement différentes. Les auteurs ont constaté que, dans cette condition, le sentiment d'appartenance illusoire de la main était réduit ou inexistant. De plus, Lloyd (2007) a constaté que l'illusion diminuait avec l'augmentation de la distance entre la vraie main et celle en caoutchouc. Notamment, l'auteur a constaté que la main en caoutchouc devait être placée à des distances inférieures à 30 cm par rapport à la vraie main pour obtenir une forte illusion. Cette distance présenterait une limite spatiale en dehors de laquelle la force de l'illusion diminue rapidement. Cette limite spatiale suggère que la main en caoutchouc doit être placée dans l'espace péripersonnel du participant. Alors que les études mentionnées ci-dessus indiquent que certaines des contraintes de l'expérimentation de l'illusion de la main en caoutchouc s'apparentent au principe spatio-temporel de l'intégration multisensorielle, il existe également

des contraintes qui ne sont pas directement liées à l'application de stimuli multimodaux mais aux informations corporelles elles-mêmes (Tsakiris & Haggard, 2005).

L'importance des facteurs liés au corps, autres que la distance spatiale entre la main réelle et la main en caoutchouc, a été mise en évidence notamment par Tsakiris et Haggard (2005), qui ont systématiquement examiné l'influence du positionnement et des caractéristiques de l'objet utilisé pour induire l'illusion. Les résultats montrent que le sentiment illusoire d'appartenance de la main lors de l'illusion ne se produit que lorsque l'objet stimulé est une main en caoutchouc de même latéralité et située dans la même position anatomique que la main du participant (Ehrsson *et al.*, 2004 ; Pavani *et al.*, 2000). Aucun sentiment d'appartenance ne semble induit pour une main en caoutchouc placée à un angle de 90 degrés par rapport à la main du participant ou lorsqu'une main en caoutchouc de latéralité opposée à la main du participant est présentée. L'importance de la position et de la plausibilité anatomique de la main en caoutchouc a été soulignée par Ide (2013) qui a constaté que les participants éprouvaient un sentiment illusoire d'appartenance de la main en caoutchouc lorsqu'elle était placée à un angle facile à imiter avec la vraie main, par opposition aux angles sans possibilité de concordance anatomique. De nombreuses études montrent que le sentiment illusoire d'appartenance ne peut être induit que pour un objet en forme de main (Bertamini & O'Sullivan, 2014 ; Guterstam *et al.*, 2013 ; Tsakiris, 2010). Mais, d'autres auteurs, utilisant des techniques de réalité virtuelle, montrent que l'objet incorporé peut être de nature très différente et pourtant induire l'illusion (par exemple, Ma & Hommel, 2015). L'ensemble de ces observations impliquent, qu'au-delà des processus d'intégration multisensorielle, les représentations corporelles jouent un rôle décisif dans l'induction de l'illusion de la main en caoutchouc (Tsakiris, 2010). Des études se sont aussi penchées sur le temps nécessaire à l'apparition du sentiment illusoire d'appartenance. Ehrsson et ses collaborateurs (Ehrsson *et al.*, 2004 ; Ehrsson, 2020) ont rapporté qu'il fallait en moyenne 11,3 s ( $\pm$  7,0 s) aux participants pour signaler un sentiment d'appartenance. Lloyd (2007) a constaté qu'il fallait en moyenne environ 6,5 s aux participants pour signaler un renvoi de la sensation tactile. Ces informations sur l'évolution dans le temps des illusions du sentiment d'appartenance d'une partie du corps restent limitées.

## *ii. Manipulations du corps entier*

Afin d'élargir aux mécanismes sous-tendant les aspects plus globaux du soi corporel telles que l'identification du soi avec un corps dans son ensemble, la localisation du soi dans

l'espace, et la perspective en première personne, des études empiriques ont adapté le paradigme de l'illusion de la main en caoutchouc à un paradigme d'illusion du corps entier (au lieu d'une simple partie du corps) où le corps entier est vu à l'aide de techniques vidéo et de réalité virtuelle (Lenggenhager *et al.*, 2007 ; Petkova & Ehrsson, 2008 ; Blanke & Metzinger, 2009 ; Blanke, 2012). Deux versions principales d'illusions multisensorielles ciblant des aspects plus globaux de soi ont été utilisées. Dans l'une, les participants voient leur corps (ou un corps factice) en face d'eux selon une perspective en troisième personne (illusion du corps entier). Dans l'autre, les participants voient en face d'eux un corps factice selon une perspective en première personne (illusion de changement de corps). Dans les deux versions de l'illusion, la stimulation visuo-tactile synchrone du corps factice comme du corps réel a augmenté l'identification de soi (i.e., le sentiment d'appartenance du corps entier) comparativement à la stimulation asynchrone. Lors de ces expériences visant une appropriation illusoire du corps entier, un changement du sentiment de localisation du soi a été observé (Lenggenhager *et al.*, 2007 ; Aspell *et al.*, 2009). Dans certains cas, un changement dans la direction de la perspective visuo-spatiale à la première personne est observé également (Ionta *et al.*, 2011 ; Pfeiffer *et al.*, 2013).

Décrivons ici l'expérimentation de l'illusion de corps entier et d'échange de corps de Petkova et Ehrsson en 2008 dans laquelle les participants sont capables de ressentir les stimulations tactiles appliquées au corps d'un mannequin et de faire l'expérience que ce corps est le leur. Cette illusion est suscitée de la manière suivante : les participants observent le corps artificiel via un casque de réalité virtuelle relié à des caméras vidéo placées sur la tête du mannequin. Les caméras sont positionnées de manière à regarder le corps du mannequin, et ainsi, les participants voient le corps du mannequin à l'endroit où ils verraient normalement leur propre corps. L'illusion est évoquée lorsque l'expérimentateur applique des stimulations tactiles synchrones identiques sur le corps du mannequin et sur le corps du participant. L'illusion est abolie, ou considérablement réduite, si le mannequin est remplacé par un objet qui n'a pas de forme humanoïde (par exemple, un bloc de bois) ou si les stimulations tactiles appliquées aux deux corps sont asynchrones. Ces résultats suggèrent qu'au cœur de ce phénomène perceptif se trouve l'intégration de multiples sources d'informations sensorielles centrées sur la localisation spatiale du « nouveau » corps (Petkova & Ehrsson, 2008). Cependant, une question importante est le rôle joué par la perspective visuelle dans le processus de perception d'un corps entier comme le sien. Or, en cognition spatiale, une distinction fondamentale est faite entre la perspective à la première personne (1PP) et la perspective à la troisième personne (3PP) (Vogele & Fink, 2003), liées respectivement aux cadres de référence égocentriques et

allocentriques (Burgess, 2006). Un référentiel égocentrique est un système de coordonnées centré sur le corps, et est considéré comme important pour les fonctions liées à la perception et à la réalisation d'actions (Fogassi *et al.*, 1992 ; Graziano & Gross, 1997). En revanche, le référentiel allocentrique correspond à des coordonnées universelles centrées sur un point de référence dans l'espace extrapersonnel. L'incertitude sur le rôle joué par la perspective visuelle dans le sentiment d'appartenance du corps provient à la fois des résultats expérimentaux chez des individus en bonne santé et de certaines conditions neurologiques qui suggèrent que la relation entre la conscience de soi et la perspective visuelle à la première personne n'est pas aisée. Par exemple, dans les cas d'autoscopie, une forme d'expérience hors du corps dans laquelle les gens se perçoivent comme étant en dehors de leur propre corps en le regardant d'un point de vue égocentrique altéré, les gens rapportent toujours que le corps qu'ils observent est leur propre corps et ainsi démontrent une auto-attribution du corps, intacte. Petkova et Ehrsson (2011) ont quantifié la force de l'illusion d'échange de corps dans des conditions où les participants observaient ce corps artificiel du point de vue de la première ou de la troisième personne. Les résultats cohérents des rapports subjectifs et des enregistrements physiologiques montrent que la perspective visuelle à la première personne est essentielle pour l'induction de cette illusion d'appartenance du corps entier. Cela démontre que les processus d'intégration multisensorielle produisant le sentiment de soi corporel opèrent dans un cadre de référence égocentrique (Ehrsson *et al.*, 2004 ; Makin *et al.*, 2008 ; Petkova & Ehrsson, 2008 ; Petkova *et al.*, 2011).

#### **b. Manipulations motrices**

Des études ont également été menées pour déterminer si l'illusion d'incorporation pouvait être provoquée par des mouvements plutôt que par une stimulation visuo-tactile passive (Tsakiris *et al.*, 2006 ; Dummer *et al.*, 2009 ; Kalckert & Ehrsson, 2012 ; Braun *et al.*, 2014 ; Caspar *et al.*, 2015 ; Jenkinson & Preston, 2015). En 2012, Kalckert et Ehrsson, ont proposé une expérimentation de l'illusion de la main en caoutchouc dans laquelle l'index de la main réelle est relié par une tige traversante à l'index de la main artificielle qui peut ainsi se déplacer de manière synchrone au doigt du participant, qui, lui, est caché visuellement (Figure 1-5). Cette configuration permet d'étudier les mécanismes contribuant au sentiment d'appartenance et au sentiment d'agentivité. Comme dans l'expérimentation de l'illusion classique, les participants développent un sentiment d'appropriation de la main factice lorsque les mouvements des doigts du sujet et de la main factice sont synchrones, ce qui ne se produit pas lorsqu'ils sont

asynchrones (Kalckert & Ehrsson, 2014). La version active de l'illusion dépend de l'intégration des informations visuelles et kinesthésiques sur les mouvements des doigts et peut être induite avec des mouvements de doigts actifs et passifs (déplacements des doigts du sujet par l'expérimentateur). Cependant, dans la première version de mouvements actifs, les processus de contrôle moteur sont engagés et les participants ressentent un sentiment d'agentivité envers la main factice, ils ont l'impression de générer et de contrôler les mouvements de la main en caoutchouc (Kalckert & Ehrsson, 2012).



**Figure 1-5 : Illustration de la configuration de l'illusion de main en caoutchouc en mouvement** (Figure reproduite de Kalckert, A., & Ehrsson, H. H. (2014). *The moving rubber hand illusion revisited: comparing movements and visuotactile stimulation to induce illusory ownership. Conscious. Cogn.* 26, p. 119). Les participants font des mouvements d'extension rapides avec leur vrai index (à l'intérieur de la boîte), ce qui entraîne les mouvements correspondants de l'index de la main en caoutchouc (sur le dessus de la boîte). Les deux mains sont couvertes de gants en latex. L'index du participant et l'index artificiel sont reliés via une petite tige qui traverse la table. Par conséquent, chaque fois que le participant déplace son propre index vers le haut ou vers le bas, ou que la tige est déplacée vers le haut ou vers le bas par l'expérimentateur, l'index de la main artificielle se déplace en conséquence. L'apparition du sentiment d'appartenance et du sentiment d'agentivité peut être systématiquement étudiée en faisant varier le mode de l'agent (i.e. si les mouvements artificiels des doigts sont auto-générés ou générés par l'expérimentateur) et par le positionnement de la main artificielle (Kalckert, A., & Ehrsson, H. H. (2014).

Kalckert et Ehrsson (2012) ont ainsi mené une étude systématique sur l'interaction entre le sentiment d'appartenance et le sentiment d'agentivité, selon le mode volontaire ou passif de l'action et selon la position alignée ou non alignée de la main artificielle par rapport à la main réelle du participant. Les résultats ont permis de conclure que le sentiment d'appartenance et le sentiment d'agentivité étaient tous deux inductibles par ce paradigme et pouvaient être

doublement dissociés expérimentalement. Cependant, si les conditions expérimentales permettaient leur émergence concomitante, ces deux sentiments pouvaient aussi se renforcer mutuellement.

Dans une étude similaire (Dummer *et al.*, 2009), la main réelle du participant était reliée à la main artificielle au moyen d'une attelle, de sorte que chaque fois que le participant déplaçait sa propre main en avant ou en arrière, ou que l'expérimentateur déplaçait l'attelle en avant ou en arrière, la main réelle du participant et la main artificielle bougeaient simultanément en résonance. L'objectif des auteurs était de comparer l'effet d'une stimulation visuo-tactile synchrone par rapport à l'effet de mouvements actifs ou passifs des mains. Ils ont montré, qu'en condition synchrone, le sentiment illusoire d'appartenance de la main factice était présent en stimulation visuo-tactile et lors des mouvements, et qu'il était d'intensité équivalente. Les chercheurs ont cependant observé des indications de tendance pour un sentiment d'appartenance plus fort, lors des mouvements actifs plutôt que passifs. Cela suggère que l'action volontaire dans ce cas favorise le sentiment d'appartenance.

Walsh et ses collaborateurs en 2011 ont également étudié l'induction du sentiment illusoire d'appartenance lors de mouvements actifs et passifs, localisés au niveau de l'index et non pas de la main entière comme précédemment (Walsh *et al.*, 2011). Les auteurs ont anesthésié l'index utilisé pour les mouvements afin de bloquer sélectivement l'information sensorielle tactile, l'information proprioceptive provenant de l'index en mouvement restant intacte. Suite à cette manipulation, les chercheurs ont constaté que, même en l'absence complète d'information sensorielle tactile, on peut induire un sentiment d'appartenance illusoire sur un faux doigt, tant que ce faux doigt se déplace en synchronie spatio-temporelle avec le propre doigt du participant. De plus, contrairement à Dummer et ses collaborateurs (Dummer *et al.*, 2009) et à d'autres études (Kalckert & Ehrsson, 2012 ; Braun *et al.*, 2014), Walsh et ses collaborateurs n'ont trouvé aucune preuve que les mouvements volontaires induisent un sentiment illusoire d'appartenance plus fort que les mouvements passifs. Ils ont donc suggéré que l'action volontaire n'est en fait pas cruciale pour induire le sentiment illusoire d'appartenance (Walsh *et al.*, 2011).

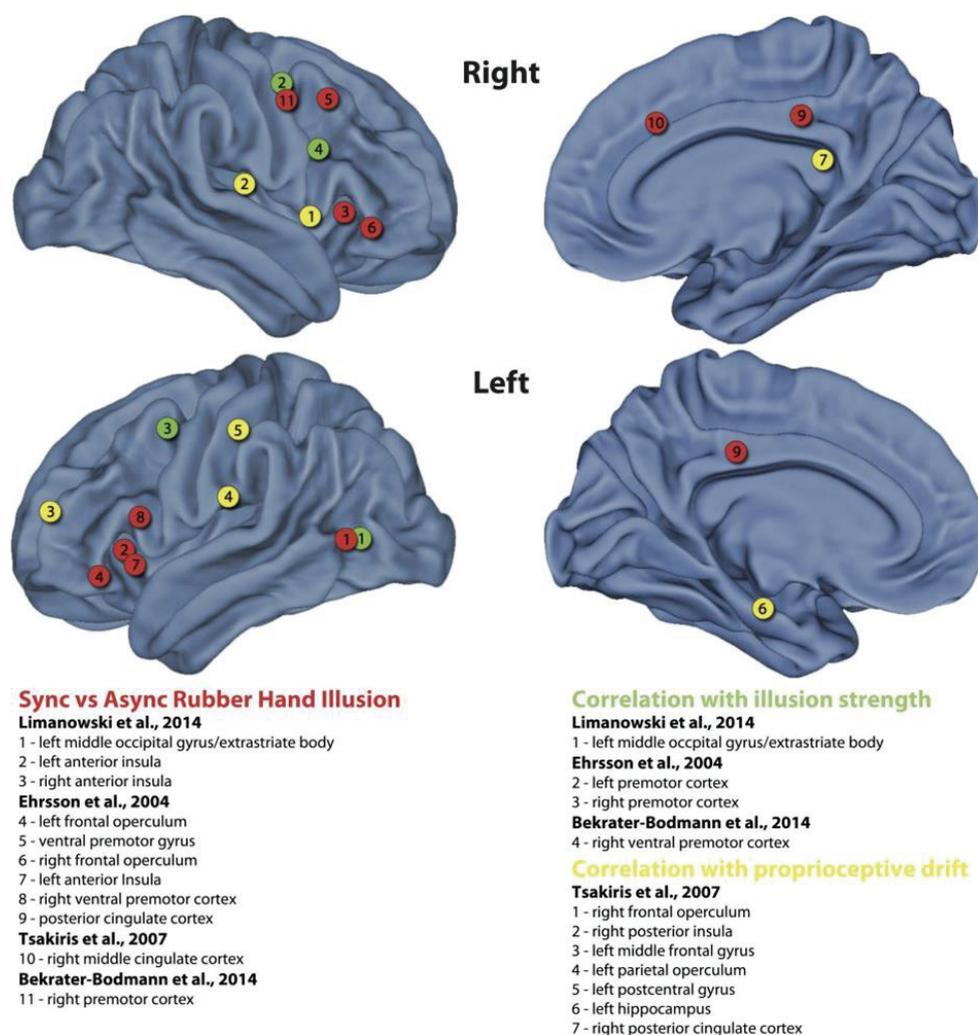
La question de l'évolution temporelle du sentiment d'appartenance en situation de mouvement –c'est-à-dire combien de temps faut-il pour que les participants commencent à s'approprier la main factice– a été étudié par Kalckert et Ehrsson en 2017, dans une adaptation de l'expérience d'illusion de la main en caoutchouc, basée sur les mouvements des doigts. Ils

ont mesuré le temps moyen d'apparition dans des conditions de mouvement actif et passif. Cette comparaison leur a permis d'explorer davantage le rôle possible des intentions et des processus de contrôle moteur qui ne sont présents que dans la condition de mouvement actif. Les résultats d'un grand groupe de participants en bonne santé ( $n = 117$ ) ont montré qu'en moyenne l'illusion du sentiment d'appartenance a mis environ 23 secondes à émerger (actif : 22,8 s ; passif : 23,2 s), la plupart des participants éprouvant l'illusion dans la première minute.

### 1.2.2. **Corrélat neuronal**

#### a. **Corrélat neuronal du sentiment d'appartenance du corps**

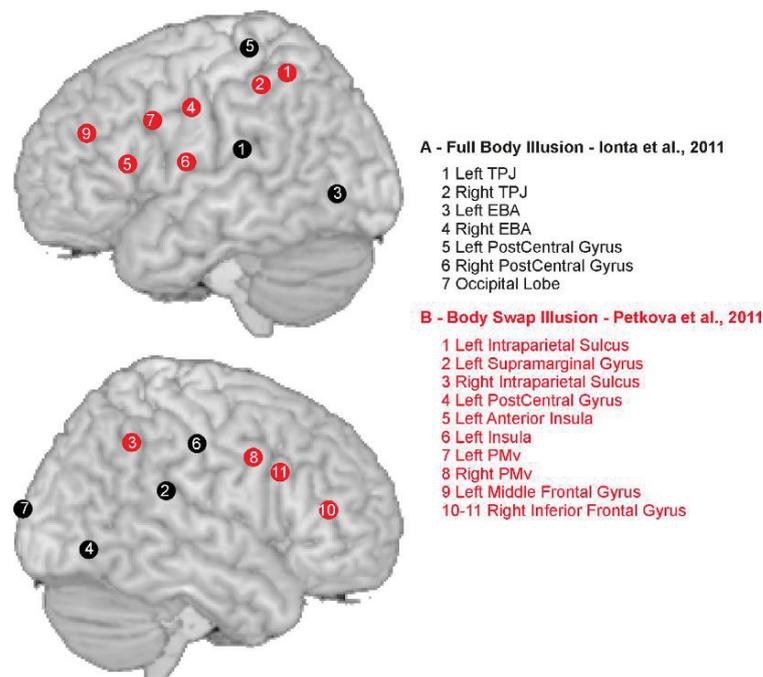
Les différentes caractéristiques du sentiment d'appartenance semblent également se refléter dans l'activité neuronale différentielle révélée par de récentes études de neuroimagerie fonctionnelle. La Figure 1-6 adaptée de la Figure 2 de l'article de revue de Lenggenhaner et Lopez (2015) montre les principales régions du cerveau impliquées, mises en évidence par imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) ou par tomographie par émission de positrons (TEP) lors d'expériences d'illusion de la main en caoutchouc (Bekrater-Bodmann, 2014 ; Ehrsson *et al.*, 2004 ; Limanowski *et al.*, 2014 ; Tsakiris, 2006). Les modes d'activation dépendent de la façon dont l'illusion a été quantifiée. La comparaison entre la condition d'illusion (c'est-à-dire, une caresse synchrone) et la condition de contrôle révèle un réseau comprenant les cortex insulaire, cingulaire, prémoteur, et latéral occipital (zone de corps extrastriée). Les domaines dans lesquels les réponses hémodynamiques correspondent à un fort sentiment illusoire d'appartenance du corps incluent le cortex prémoteur et la zone de corps extrastriée, alors que le sentiment de délocalisation de la main physique (appelée « dérive proprioceptive ») est en corrélation, en particulier, avec les réponses dans l'insula postérieure droit, l'opercule frontal droit et le gyrus frontal moyen gauche (Figure 1-6). Différentes régions du cerveau sont impliquées dans le sentiment illusoire d'appartenance du corps et de délocalisation de la main physique. Ces réponses suggèrent fortement l'existence de sous-composants distincts sous-jacents au soi corporel.



**Figure 1-6 : Cartographie des résultats des études d'imagerie cérébrale de l'illusion de la main en caoutchouc** (Lenggenhager, B. & Lopez, C., 2015 ; Bekrater-Bodmann et al., 2014 ; Ehrsson et al., 2004 ; Limanowski et al., 2014 ; Tsakiris et al., 2006). Les points rouges indiquent une activation cérébrale significative dans la comparaison de la stimulation visuo-tactile synchronisée (condition d'illusion) avec la stimulation visuo-tactile asynchrone de contrôle. Les cercles pleins verts indiquent les zones du cerveau où la réponse hémodynamique est corrélée avec l'importance de l'effet d'illusion de la main en caoutchouc. Les cercles pleins jaunes indiquent des zones qui sont en corrélation significative avec « la dérive proprioceptive » (Figure reproduite de Lenggenhager, B. & Lopez, C. (2015). *Vestibular Contributions to the Sense of Body, Self, and Others*. In T. Metzinger & J. M. Windt (Eds), 1-38, p 3).

La Figure 1-7, adaptée de la Figure 2 de l'article de Serino et ses collaborateurs (Serino et al., 2013), compare deux études d'imagerie cérébrale utilisant des illusions du corps entier. Bien que l'identification corporelle du soi avec un corps factice vu à la première personne soit associée à l'activité des zones prémotrices (Petkova et al., 2011), des changements dans la

localisation de soi et la perspective visuo-spatiale sont associés à l'activité dans la jonction temporo-pariétale (Ionta *et al.*, 2011). Le rôle du cortex pariétal, impliqué dans le traitement visuel et tactile, semble être la résolution des conflits entre l'information visuelle et l'information tactile, mais aussi la re-calibration proprioceptive, sous-tendu par le cortex prémoteur ventral, région impliquée dans la planification des mouvements. (par exemple, Tsakiris *et al.*, 2007). L'activation de l'insula est associée au traitement somatosensoriel de haut niveau, à savoir la conscience du soi corporel et le traitement de l'information affective en relation avec le corps (Craig, 2009). Une activité accrue dans le cortex cingulaire antérieur est liée à l'anticipation de la douleur impliquant la prise de décision. L'activation du cortex cingulaire antérieur et de l'insula sont similaires à celles observées dans les études d'anticipation de la douleur, de la douleur empathique et de l'anxiété. Une activité accrue a aussi été observée dans la zone de corps extrastrisée, région lors de l'induction du sentiment d'appartenance, région impliquée dans le traitement visuel d'images statique ou en mouvement du corps humain ou de parties de celui-ci (Limanowski *et al.*, 2014).



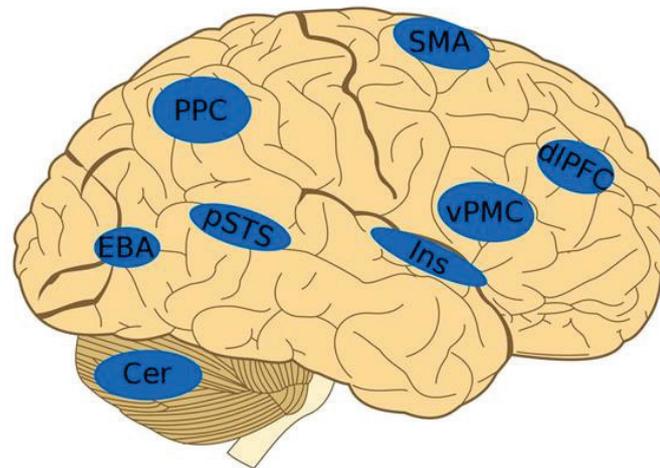
**Figure 1-7 : Une comparaison de l'activité cérébrale associée à deux illusions ciblant la manipulation d'aspects plus globaux du soi corporel (Serino, A., 2013) : l'illusion du corps entier et l'illusion de changement de corps. Deux études d'IRMf utilisant l'illusion du corps entier (Ionta et al. 2011, cercle plein noir) ou l'illusion de changement de corps (Petkova et al., 2011, cercle plein rouge) sont comparées et tracées. Seules les zones significativement plus activées pendant la stimulation visuo-tactile synchrone (condition d'illusion), par rapport aux conditions de contrôle, sont montrées (Figure reproduite de Serino, A., et al. (2013). *Bodily ownership and self-location: components of bodily self-consciousness. Consciousness and cognition*, 22(4), p. 1239).**

La jonction temporo-pariétale est une région située à proximité du cortex vestibulaire pariéto-insulaire. L'activité observée dans cette région suggère que le cortex vestibulaire pourrait jouer un rôle dans la localisation du soi et la perspective visuo-spatiale (Figure 1-7). Récemment, Lenggenhager & Lopez ont soulevé l'importance du système vestibulaire activé par la gravité –force constante sous laquelle nous avons évolué– mais aussi lors de toutes sortes de mouvements passifs et actifs de la tête et du corps entier. Se déplacer dans un environnement est nécessaire pour le développement du sens du soi corporel. Le système vestibulaire est donc susceptible de contribuer non seulement aux aspects les plus fondamentaux du soi mais aussi aux différents aspects implicites et explicites de l'expérience du soi corporel dans la vie quotidienne tels que la perception du corps, le sentiment d'appartenance du corps, le sentiment d'agentivité et l'identification de soi. Le système vestibulaire est intrinsèquement et fortement lié à d'autres systèmes sensoriels tels que le toucher, la douleur, l'intéroception et la proprioception (Lenggenhager & Lopez, 2018).

#### **b. Corrélats neuronaux du sentiment d'agentivité**

Les corrélats neuronaux du sentiment d'agentivité ont été explicités par David et ses collaborateurs (David *et al.*, 2008) sur la base des zones cérébrales impliquées dans le sentiment d'agentivité et mises en évidence lors d'expériences de neuroimagerie IRMf et TEP (Fink *et al.*, 1999 ; Blakemore & Decety, 2001 ; Farrer & Frith, 2002 ; Farrer *et al.*, 2003 ; Jeannerod, 2004). Les zones cérébrales identifiées peuvent être distinguées en deux groupes. Le premier groupe comprend des régions cérébrales connues pour être impliquées dans le système moteur telles que le cortex prémoteur ventral (CPMv), l'aire motrice supplémentaire (SMA) et le cervelet. Le deuxième groupe englobe les cortex associatifs hétéromodaux incluant le cortex pariétal postérieur (CPp) impliqué dans l'orientation visuo-spatiale du corps, le cortex préfrontal dorsolatéral (CPfdl) connecté au cortex pariétal, le segment postérieur du sillon temporal supérieur (pSTS) et l'insula (Figure 1-8). Cependant, la manière dont toutes ces différentes régions du cerveau contribuent à l'émergence du sentiment d'agentivité reste spéculative. Une implication fonctionnelle des aires sensorimotrices apparaît cependant plausible face au modèle comparateur qui sera décrit dans la suite de ce document (Tsakiris *et al.*, 2007). De même, une implication de l'insula apparaît compréhensible compte tenu de son implication générale dans la conscience de soi corporelle (Baier & Karnath, 2008; Craig *et al.*, 2009; Kamath & Baier, 2010). La mise en évidence du système de neurones miroirs dans le cortex prémoteur du singe, neurones émettant des potentiels d'action non seulement lorsque le

singe faisait un mouvement mais aussi lorsqu'il regardait un autre animal ou humain faire le même geste (Rizzolati, *et al.*, 1998) a été confirmé chez l'homme dans le cortex prémoteur ventral ainsi que dans le lobe pariétal inférieur.



**Figure 1-8 : Régions cérébrales associées au sens de l'action** (adaptation de la Figure 2 issue de la publication de N. David *et al.* (2008). *Conscience et cognition* 17, 523–534) par Ondřej Havlíček (Havlíček, 2016). Les zones cérébrales identifiées sont les régions cérébrales connues pour être impliquées dans le système moteur telles que le cortex prémoteur ventral (CPMv), l'aire motrice supplémentaire (SMA) et le cervelet et les cortex associatifs hétéromodales incluant le cortex pariétal postérieur (CPp), le cortex préfrontal dorsolatéral CPfdl), le segment postérieur du sillon temporal supérieur (pSTS) et l'insula (Ins).

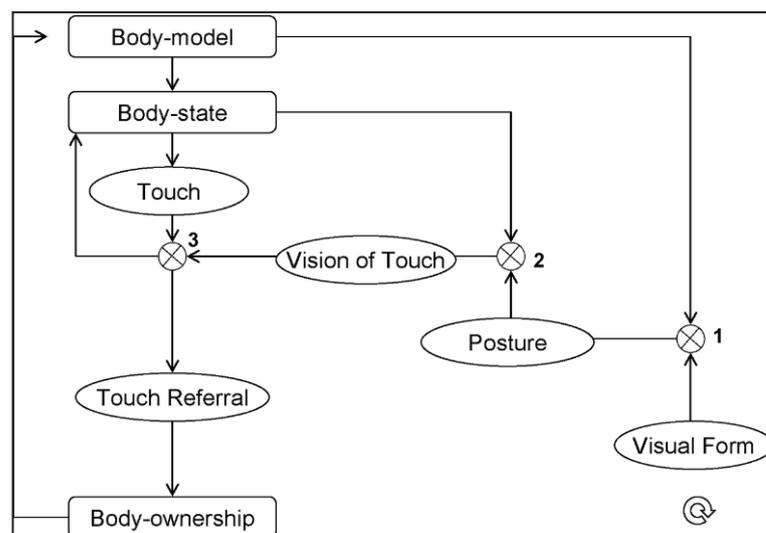
### 1.2.3. Modèles cognitifs des sentiments d'appartenance et d'agentivité

#### a. Le sentiment d'appartenance : le modèle neurocognitif de Tsakiris

En 2010, Tsakiris a proposé un modèle neurocognitif du sentiment illusoire d'appartenance comme étant la conséquence de l'interaction entre les *input* multi sensoriels et des modèles internes du corps. Makin, Holmes et Ehrsson avaient proposé en 2008 une explication de l'illusion de la main en caoutchouc basée sur des processus d'intégration multisensorielle dans l'espace périmain (Maravita *et al.*, 2003), sans la nécessité d'une modulation *top-down* par les représentations internes du corps. Dans leur proposition, l'illusion de la main en caoutchouc se produit lorsque la main factice est située dans une position anatomiquement plausible, et, lorsque les événements visuels et tactiles synchrones sont tous

deux situés à proximité de la main visible, processus nécessaires à l'expérience du sentiment illusoire d'appartenance. Cependant, les résultats montrent que l'hypothèse de l'intégration multisensorielle dans l'espace péripersonnel de la main n'est pas suffisante en elle-même pour décrire le sentiment illusoire d'appartenance. En effet, d'autres facteurs tels que la congruence visuelle de forme entre l'objet vu et la partie du corps ressentie (Haans *et al.*, 2008 ; Tsakiris & Haggard, 2005), la congruence anatomique (Graziano *et al.*, 2000 ; Pavani *et al.*, 2000 ; Tsakiris & Haggard, 2005), la congruence volumétrique (Pavani & Zampini, 2007), la congruence posturale (Pavani *et al.*, 2000 ; Austen *et al.*, 2004 ; Ehrsson *et al.*, 2004 ; Tsakiris & Haggard, 2005 ; Costantini & Haggard, 2007), et la relation spatiale entre la partie du corps vue et la partie du corps ressentie (Lloyd, 2007), modulent l'induction de l'illusion de la main en caoutchouc et l'expérience du sentiment illusoire d'appartenance. Le modèle de Tsakiris (2010) tient compte de l'insuffisance de la multi sensorialité pour la mise en place du sentiment d'appartenance et s'appuie sur les facteurs qui induisent l'émergence du sentiment d'appartenance (Manning, 2016). Ces facteurs sont, comme cités précédemment, la concordance entre la forme visuelle de la partie du corps vue et la partie du corps ressenti, la congruence posturale entre la partie du corps vue et la partie du corps ressenti, et la congruence spatiale entre la partie du corps vue et la partie du corps ressenti (Tsakiris & Haggard, 2005). Ce modèle met en avant l'interaction entre les *input* multi-sensoriels et le traitement cognitif *on line* du modèle du corps. Ces différentes composantes sont les points d'ancrage de ce modèle dont le schéma représentatif est présenté dans la Figure 1-9. Trois points de comparaison entre ses différentes composantes permettent d'induire l'émergence du sentiment d'appartenance, chaque étape ayant une signature neurale issue des analyses comportementales (Tsakiris *et al.*, 2007), électroencéphalographiques (Press, 2008) et en Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (Ehrsson *et al.*, 2004 ; Ehrsson *et al.*, 2007). La première comparaison a lieu entre la forme visuelle de la main que le sujet voit et le modèle du corps constitué des propriétés visuelles, anatomiques et structurales –qui est différent du schéma corporel mis à jour continuellement. Cette étape est un test des possibilités d'incorporer l'objet vu comme une partie du corps. Plus la forme de l'objet est proche, plus fort sera le sentiment d'appartenance. Ce modèle corporel ne doit pas non plus être assimilé à l'image du corps. Tsakiris (Tsakiris, 2010) suggère une activation de la jonction temporo-pariétale droite essentielle pour l'intégration des signaux multisensoriels mais aussi contribuant à la prise de décision concernant la faisabilité d'incorporer dans les représentations référentes du corps l'objet vu. La deuxième comparaison se fait entre l'état actuel du corps et les caractéristiques posturales et anatomiques de la partie du corps qui doit induire un sentiment d'appartenance. Cette

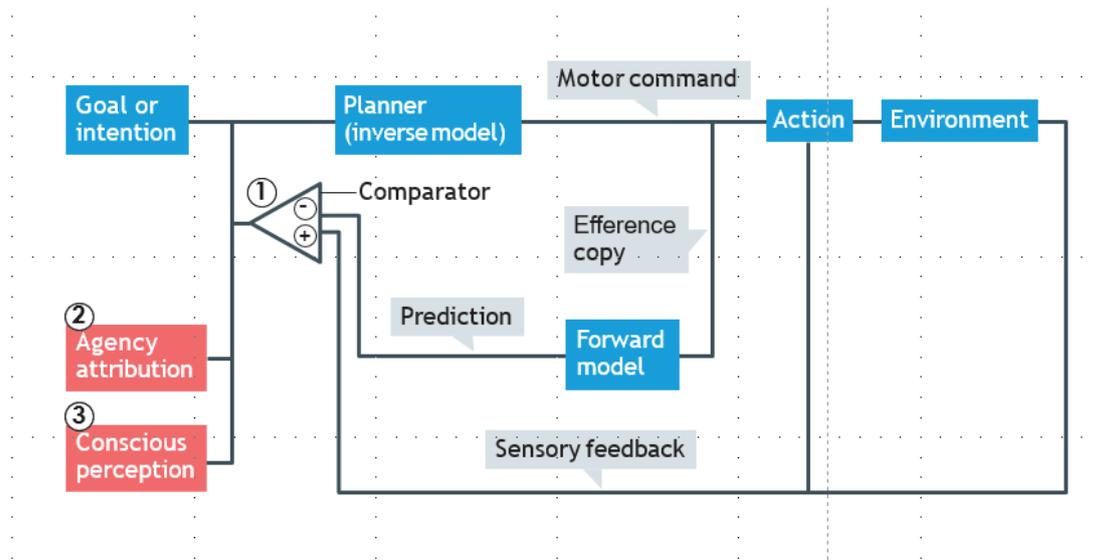
comparaison est étayée par l'activation des régions antérieures du cortex pariétal, c'est-à-dire, les cortex somatosensoriels primaire et secondaire. La troisième comparaison se joue entre le toucher, la vision du toucher et la temporalité de la synchronie, synchrone ou asynchrone, qui détermine si oui ou non ce point de comparaison va donner lieu à un sentiment illusoire d'appartenance (Manning, 2016). Le cortex cingulaire postérieur sous-tend cette troisième comparaison visant à cerner le conflit entre les informations visuelles et tactiles et à recalibrer les systèmes de coordonnées visuelles et tactiles (Ehrsson *et al.*, 2004 ; Makin *et al.*, 2008). Cet étalonnage se traduit par une référence tactile, soutenue par une activité dans le cortex pré-moteur (Ehrsson *et al.*, 2004). Enfin, l'expérience subjective du sentiment d'appartenance, par l'activité dans l'insula postérieure droite (Tsakiris *et al.*, 2007), mettra à jour le modèle corporel, ce qui aboutira à l'incorporation de la main et de la réglementation physiologique subséquente de l'organisme (Moseley *et al.*, 2008).



**Figure 1-9 : Modèle neurocognitif du sentiment d'appartenance lors de l'expérimentation de l'illusion de la main en caoutchouc** basé sur trois points de comparaison entre ses différentes composantes, la forme visuelle et le modèle corporel ; les caractéristiques posturales et anatomiques et l'état actuel du corps ; la vision du toucher, le ressenti du toucher et la temporalité de la synchronie (Figure reproduite de Tsakiris, M. (2010). *My body in the brain: a neurocognitive model of body-ownership*. *Neuropsychologia*, 48(3), p. 707). Le cercle croisé représente un comparateur. La flèche de recyclage indique une boucle.

### b. Le sentiment d'agentivité implicite et explicite

Le sentiment d'agentivité nous permet de différencier les actions que l'on génère de celles qui sont générées par autrui (Gallagher, 2000 ; Georgieff & Jeannerod, 1998 ; Pacherie & Jeannerod, 2004 ; Balconi *et al.*, 2010). Ce sentiment d'agentivité est une structure phénoménale complexe et non unitaire. Plusieurs auteurs ont récemment préconisé des niveaux distincts du sentiment d'agentivité (Synofzik *et al.*, 2008 ; Jeannerod, 2009 ; Gallagher, 2012 ; Moore, 2012) singularisés par implicite ou explicite selon Synofzik et ses collaborateurs. (2008). Le sentiment d'agentivité implicite est un processus de bas niveau, au bord de la conscience, restreint à une représentation simple de l'action comme étant causée ou non par soi. Cela est étayé par des preuves empiriques comme par exemple des «violations» mineures d'actions intentionnelles ou des conséquences d'actions qui n'arrivent pas nécessairement à la conscience –comme de brefs (250 ms) retards temporels dans la rétroaction sensorielle (Blakemore & Sirigu, 2003 ; Fournieret & Jeannerod, 1998)– alors que les signatures neuronales de telles violations peuvent être observées (David *et al.*, 2007). Le sentiment d'agentivité explicite est au contraire une attribution causale consciente d'une action à un individu particulier. Ce processus de haut niveau, pouvant se verbaliser, s'appuie sur le niveau implicite du sentiment d'agentivité. Cependant, il inclut d'autres indices tels que les informations contextuelles, les croyances préalables, etc. Le modèle du comparateur (Frith, 2000 ; Blakemore *et al.*, 2002) schématisé dans la Figure 1-10 éclaire ce niveau implicite du sentiment d'agentivité en proposant que l'expérience d'agentivité est dépendante de la comparaison entre les conséquences sensorielles réelles d'une action et les conséquences sensorielles prédites par un modèle interne de l'action (Lafleur *et al.*, 2016). Deux modèles internes de l'action coexistent : une copie efférente émise en parallèle de la commande motrice et contenant les prédictions sensorielles de l'action, et le modèle inverse qui pourvoit au système la commande motrice adéquate pour parvenir à l'état souhaité. L'erreur de prédiction est déduite de la comparaison entre l'état prédit déterminé par la copie efférente et l'état réel donné par le retour sensoriel. Lorsqu'il y a similitude des deux états alors les conséquences de l'action sont considérées comme provenant de soi et un sentiment d'agentivité apparaît. Dans le cas d'une disparité des signaux, les conséquences sensorielles de l'action sont imputées à une source externe (Lafleur *et al.*, 2016).



**Figure 1-10 : Le schéma du modèle du comparateur** (Figure reproduite de Haggard, P. (2017). *Sense of agency in the human brain*, 18, p. 202). Dans le modèle comparateur du contrôle de l'action, une action commence par une intention ou un état de but désiré. Un modèle inverse calcule la commande motrice nécessaire pour atteindre l'objectif (ou du moins s'en approcher) et génère la commande motrice qui entraînera l'action. Un modèle précurseur utilise une copie de la commande motrice actuelle (copie efférente) pour prédire les conséquences sensorielles probables de la commande motrice. Cette prédiction est comparée à des signaux de rétroaction sensorielle qui fournissent de l'information sur l'action en cours et sur ses effets sur l'environnement externe. Le résultat de la comparaison peut être utilisé de trois manières : 1) pour ajuster la commande motrice actuelle, 2) pour attribuer l'agentivité des actions et des événements environnementaux (si le comparateur donne un résultat de zéro alors l'événement est causé par sa propre action), 3) et pour atténuer sensations prévisibles auto-générées.

Lorsque les mouvements autogénérés peuvent être prédits –stimuli d'origine endogène comme par exemple se chatouiller soi-même–, l'erreur de prédiction est infime et le fonctionnement du modèle comparateur conduit à une inhibition du retour sensoriel prédit par la copie efférente. Ainsi, le cerveau identifie la nature autogénérée d'une action lorsque celle-ci peut être prédite par nos mouvements en cours d'exécution. Ce phénomène induit une diminution de l'intensité ressentie des conséquences sensorielles associées à une action d'origine endogène. Identifiée dans diverses modalités sensorielles –tactile, auditive, et visuelle– l'atténuation sensorielle constitue ainsi un marqueur comportemental approprié pour mesurer les mécanismes implicites du sentiment d'agentivité. Au cours de l'action, une divergence entre les prédictions du cervelet et les conséquences sensorielles active le cortex

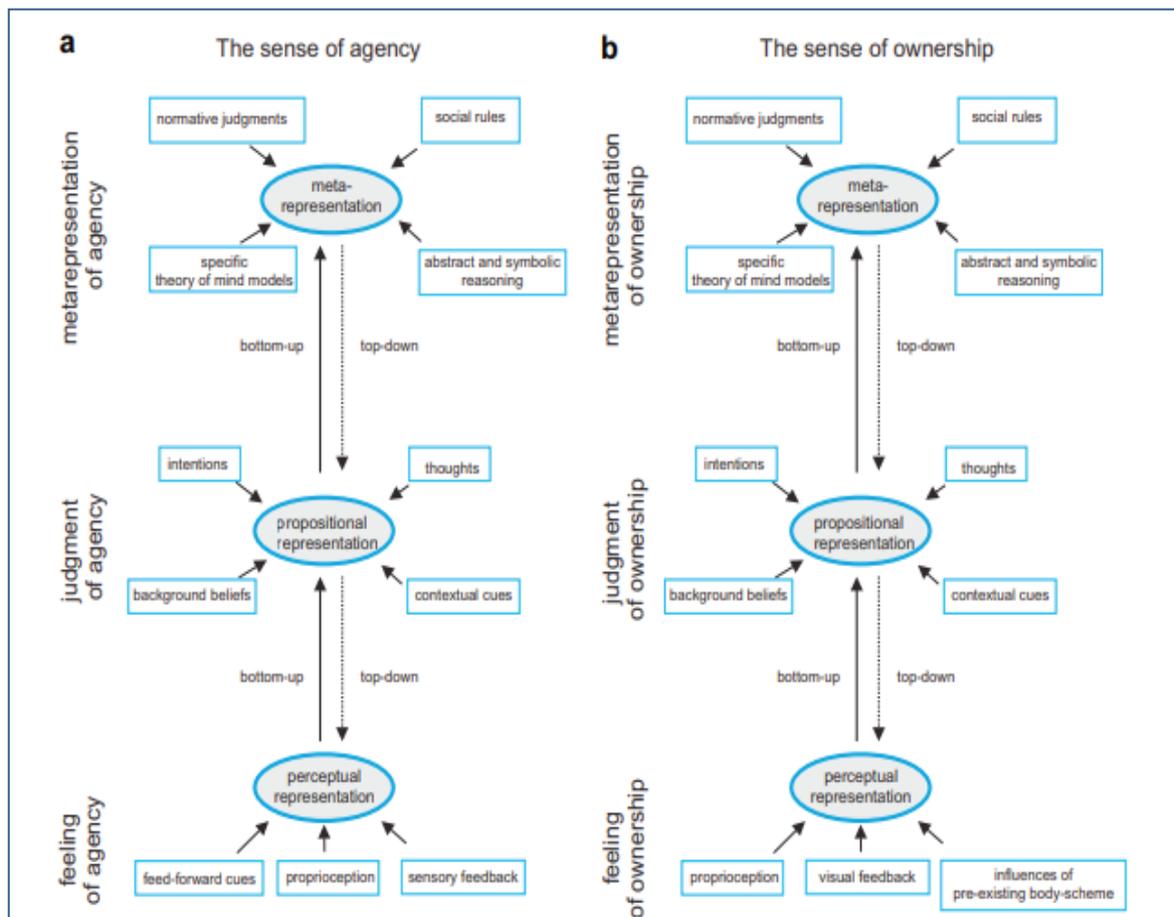
pariétal postérieur et le gyrus pariétal inférieur (David *et al.*, 2010). La concordance entre les prédictions et le retour sensoriel induit une atténuation sensorielle (Lafleur *et al.*, 2016).

Par ailleurs, il a été montré que l'intervalle de temps entre une action et ses conséquences est perçu comme plus bref lorsque l'action est intentionnelle et qu'on en est l'auteur. Cet effet, appelé liage intentionnel (Haggard, 2002), est supprimé si le mouvement est passif ou si les conséquences de l'action ne peuvent être prédites (Moore & Obhi, 2012). Il est un marqueur approprié du sentiment d'agentivité implicite. Une perturbation de l'aire motrice supplémentaire (Moore & Obhi, 2012) réduit le liage intentionnel entre l'action et son effet.

Toutefois, le sentiment d'agentivité ne peut pas, dans certaines situations, s'interpréter par l'approche sensorimotrice. En 1999, Wegner et Wheatley ont proposé une autre approche en reliant le sentiment d'agentivité à une reconstruction rétrospective d'une relation causale entre intention et action. Pour Wegner et Wheatley (1999), nous avons une expérience de volonté consciente vis-à-vis d'une action lorsque nous inférons que notre pensée a causé cette action. Trois principes permettraient de faire cette inférence induisant l'émergence d'un sentiment d'agentivité : le principe de priorité –l'intention précède l'action–, le principe de cohérence –l'intention est cohérente avec l'action– et le principe d'exclusivité –d'autres causes potentielles de l'action ne sont pas présentes–. Le sentiment d'agentivité résulterait de la reconstruction *a posteriori* du lien causal réunissant nos intentions et nos actions.

Synofzik et ses collaborateurs (2008) ont proposé un modèle de pondération multifactorielle que l'on peut voir comme un compromis entre le modèle comparateur et la vision inférentielle. Ce modèle s'appuie sur la distinction entre la sensation d'agentivité –*feeling of agency*– et le jugement d'agentivité –*judgement of agency*– et suggère que le sentiment d'agentivité provient de nombreux indices d'agentivité différents, qui sont constamment pondérés en fonction de leur fiabilité dans une situation donnée. Le niveau de sensation d'agentivité est décrit comme étant pré-réflexif, de bas niveau et non conceptuel, opérant à la marge de la conscience. Le niveau de jugement d'agentivité en revanche, est un processus d'ordre supérieur, qui peut être rapporté verbalement. Il se fonde partiellement sur le niveau implicite du sentiment d'agentivité, mais intègre également d'autres indices (informations contextuelles, croyances préalables, etc.). Sa phénoménologie est plus complexe et peut aller au-delà du simple contrôle moteur. Cette phénoménologie reflète le jugement d'une personne à être l'auteur d'une action. Une étude empirique a examiné l'interaction entre les niveaux de sensation et de jugement et montré une dissociation des deux niveaux (Moore *et al.*,

2012). La Figure 1-11 illustre schématiquement la distinction faite par Synofzik et ses collaborateurs (Synofzik *et al.*, 2008) entre sensation, jugement et méta-représentation de l'agentivité mais aussi de l'appartenance. Ce modèle général ne nie pas la contribution du modèle comparateur dans de nombreuses situations d'agentivité, mais il suggère que d'autres signaux contribuent également à l'émergence du sentiment d'agentivité, la pondération des différents indices d'agentivité étant réalisée par intégration bayésienne des indices (Synofzik *et al.*, 2010 ; Moore & Fletcher, 2012 ; Vosgerau & Synofzik, 2012) : le cerveau applique une estimation du maximum de vraisemblance à tous ses indices d'agentivité et dérive ainsi une estimation d'agentivité globale dont la variance du signal est bien inférieure aux variances du signal de chaque indice d'agentivité pris isolément ( Moore *et al.*, 2009 ; Moore & Fletcher, 2012 ).



**Figure 1-11 : Modèle métacognitif de Synofzik et ses collaborateurs** (Figure reproduite de de Synofzik, M., Vosgerau, G., & Newen, A. (2008). *I move, therefore I am: a new theoretical framework to investigate agency and ownership*. *Conscious. Cogn.* 17, 419). La distinction entre sensation, jugement et méta-représentation de l'agentivité a) mais aussi de l'appartenance b).

#### 1.2.4. **Modèles cognitif de la représentation de soi : vers une théorie unifiée de la représentation de soi**

La diversité des résultats expérimentaux s'appuyant sur des expériences pour lesquelles l'illusion est induite par un mouvement synchrone entre la main factice et la main réelle du participant (Tsakiris *et al.*, 2006 ; Dummer *et al.*, 2009 ; Sanchez-Vives *et al.*, 2010 ; Kalckert & Ehrsson, 2014 ; Braun *et al.*, 2014) montrent que, si les conditions expérimentales permettent leur émergence concomitante, les sentiments d'appartenance et d'agentivité se renforcent mutuellement (Braun *et al.*, 2018). Dans leur étude systématique sur l'interaction entre le sentiment d'appartenance et le sentiment d'agentivité, Kalckert et Ehrsson (2012) ont montré qu'ils pouvaient être doublement dissociés expérimentalement et donc induits par deux processus cognitifs distincts. De plus, alors que la plupart des études sur l'agentivité en neurosciences cognitives ne font aucune distinction fondamentale entre les mouvements simples des membres du corps et les actions axées sur des objectifs, Kalckert et Ehrsson ont aussi suggéré, sur la base de leurs résultats expérimentaux, que le sentiment d'agentivité lui-même n'est pas unitaire et peut être dissocié en deux composantes associées à des processus distincts: -1) le sentiment d'agentivité externe liée à la commande motrice volontaire qui est un sentiment d'agentivité envers un but et -2) le sentiment d'agentivité du corps étroitement lié au sentiment d'appartenance observé lors de manipulations passives sans aucune commande motrice, qui reposerait sur des mécanismes sous-jacents d'intégration sensorimotrice.

Bien que arguments théoriques et résultats empiriques montrent une forte interaction entre le sentiment d'appartenance et le sentiment d'agentivité, les théories neurocognitives existantes offrent une explication pour chacun pris isolément mais jamais ensemble (Braun *et al.*, 2018). En se fondant sur le codage prédictif, certains travaux visent à expliquer la représentation de soi en général (Hohwy, 2007 ; Limanowski & Blankenburg, 2013 ; Apps & Tsakiris, 2014 ; Tsakiris, 2016). Antérieurement, la théorie du codage prédictif avait été principalement adaptée à l'action et aux perceptions telles que la vision et l'audition. Le fondement du codage prédictif considère le cerveau comme une machine de prédiction de type bayésien qui tenterait d'inférer les causes cachées de son entrée sensorielle (Friston, 2010). Dans cette approche, le cerveau construit des modèles génératifs hiérarchiques sur les causes cachées de son apport sensoriel et tente continuellement de minimiser les erreurs de prédiction de ses modèles à chaque niveau hiérarchique. Ainsi, le cerveau dérive des prédictions sensorielles à partir de ses modèles, puis teste ces prédictions par rapport à son entrée sensorielle (Friston, 2010 ; Clark *et al.*, 2013). S'il y a une correspondance entre l'entrée sensorielle prévue

et l'entrée sensorielle réelle, le modèle génératif est confirmé. En cas de non-concordance entre ces entrées, une erreur de prédiction se produit et le modèle doit être mis à jour (Friston, 2012, 2013). La perception et la conscience de soi semblent avoir pour point commun de s'établir par codage prédictif (Limanowski & Blankenburg, 2013 ; Seth, 2013 ; Apps *et al.*, 2014 ; Tsakiris *et al.*, 2016) : le cerveau génère non seulement des modèles hiérarchiques sur les structures causales du monde extérieur, mais aussi sur le « Moi » le plus susceptible d'être (Tsakiris *et al.*, 2016), puis il tente de minimiser les erreurs de prédiction issues de ces modèles. Une conséquence intéressante serait que la perception et la conscience de soi soient probabilistes (Limanowski & Blankenburg, 2013) : le contenu phénoménal identifié comme étant le mien n'est rien de plus que la cause la plus probable, compte tenu de l'apport sensoriel de l'instant et de certains antécédents descendants (Seth, 2013; Tsakiris *et al.*, 2016). Cette hypothèse s'accorde bien avec la malléabilité connue –expérimentale et clinique– du sentiment d'appartenance et du sentiment d'agentivité.

L'intuition sur la façon dont le sentiment d'appartenance pourrait dépendre de la minimisation de l'erreur de prédiction d'un modèle génératif s'appuie sur les résultats des expériences d'illusion de la main en caoutchouc (Kilteni *et al.*, 2015 ; Samad *et al.*, 2015). Le point clé ici est de savoir comment le cerveau détermine si l'entrée multisensorielle induite par l'expérience a une cause commune –sa propre main– ou deux causes –sa propre main et une main artificielle supplémentaire–. Dans la théorie du codage prédictif, le cerveau compare les probabilités pour savoir si ses sensations unimodales sur les membres ont des causes communes ou indépendantes et prend ainsi en compte la similitude des sensations et la probabilité antérieure d'une cause commune. Si la probabilité estimée pour une cause commune est plus élevée que la probabilité estimée pour deux causes différentes, le cerveau fusionne les deux sensations de membres disparates ensemble et une illusion se produit. Autrement dit, le cerveau explique son erreur de prédiction en mettant à jour le modèle génératif. Toutefois, si la preuve de deux causes distinctes prévaut, le modèle génératif n'est pas mis à jour et les deux sensations de membres disparates demeurent sensiblement séparées, de sorte qu'aucune illusion ne se produit. Un sentiment illusoire d'appartenance peut donc se produire en mettant à jour le modèle génératif. Ce mécanisme est appelé l'inférence perceptuelle. Toutefois, l'inférence perceptuelle n'est pas la seule façon dont le cerveau peut réduire ses erreurs de prédiction. Son alternative est d'effectuer une action, d'amener un nouvel état sensoriel en phase avec les prédictions du modèle. C'est l'inférence active (Friston, 2013). Ainsi, s'il y a une incertitude sur l'exactitude des prédictions du modèle actuel, le cerveau peut effectuer un « contrôle de la

réalité » en effectuant une action –par exemple déplacer la main droite réelle pendant une expérience d’illusion de la main en caoutchouc du côté droit– dont les conséquences sensorielles sont potentiellement plus faciles à prévoir que l’état sensoriel actuel (Hohwy, 2007; Limanowski & Blankeburg, 2013). Si l’action initiée conduit alors à un résultat sensoriel prédit, un sentiment d’appartenance apparaît et le modèle actuel peut être maintenu. Si l’action initiée ne conduit pas au résultat sensoriel prévu, aucune sensation d’appropriation du corps ne se produit, le modèle doit alors être adapté au nouvel état sensoriel. La théorie de l’inférence intéroceptive active donne une vision énonciviste de la cognition humaine c’est-à-dire une vision selon laquelle un organisme vivant « enacte » le monde de son expérience vécue, interagissant avec son environnement. La théorie de l’inférence intéroceptive active permettrait par ailleurs de comprendre les différences observées entre les sujets au niveau des capacités intéroceptives et ainsi que leurs variations selon la situation (Ainley *et al.*, 2016). En résumé, les modèles computationnels du cerveau en tant que machine prédictive, décrivent les processus intéroceptifs comme des processus d’inférence active. Ils défendent l’implication prépondérante des *a priori* –processus descendants– en parallèle des signaux intéroceptifs ascendants (Hazem, 2018). Cette approche conduit à une vision unifiée de la représentation du soi corporel. Dans notre environnement social, notre attention s’oriente vers les stimuli les plus pertinents, notamment ceux qui accèdent en priorité à la conscience. Ces stimuli sont produits en partie par nos interactions avec les autres, qui durant les premières années de la vie ont un rôle clé dans le développement cérébral, et en conséquence dans la construction d’un sens du soi. Comme le sens du soi est avant tout incarné : il reposerait sur la perception des informations afférentes provenant du corps. Dans cette perspective, l’interaction sociale –par des influences descendantes et du fait de son importance tout au long de la vie et dans les apprentissages– joue elle aussi un rôle important dans la construction et la représentation du soi corporel (Hazem, 2018).

### 1.2.5. Marqueurs de la sensation d’incorporation

Ces nombreux exemples d’incorporation réussies démontrent la plasticité de la représentation du soi corporel. Cependant, la force et la robustesse de l’incorporation dépend de plusieurs règles ou facteurs liés aux interactions multisensorielles et à leur mode d’induction comme déjà abordé précédemment. Très récemment, Toet a publié une revue très complète de l’ensemble des résultats expérimentaux disponibles dans la littérature sur les facteurs qui

contribuent au sentiment d'incorporation (Toet, 2020). À partir de ces données expérimentales, Toet propose un classement des modalités, selon la force et la robustesse de l'effet observé : la perspective visuelle en première personne, la synchronie visuo-motrice/proprioceptive, la synchronie visuo-tactile, et la similitude visuelle.

En effet, la perspective en première personne domine le mouvement et le toucher comme facteur explicatif du sentiment d'appartenance (Slater *et al.*, 2010). Une perspective en première personne, sur un faux corps humain réaliste ou une partie du corps qui remplace spatialement le corps réel, est suffisante pour obtenir le sentiment d'appartenance (Maselli *et al.*, 2013). Dans cette condition expérimentale, il n'y a pas besoin d'une contribution supplémentaire de signaux visuotactiles ou sensorimoteurs congruents. Cependant, la contribution d'indices multisensoriels et/ou sensorimoteurs congruents est requise lorsque le niveau de réalisme du corps virtuel n'est pas suffisamment élevé ou lorsqu'il n'y a pas (ou peu) de chevauchement spatial entre les deux corps (Blom *et al.*, 2014).

Les données actuelles suggèrent que la congruence visuo-motrice (dans le contexte d'une perspective en première personne) contribue beaucoup plus au sentiment d'appartenance que la synchronie visuo-tactile (Slater *et al.*, 2010 ; Petkova *et al.*, 2011 ; Kilteni *et al.*, 2012 ; Kokkinara *et al.*, 2014). La perturbation du sentiment d'appartenance par une stimulation visuo-tactile asynchrone peut être neutralisée par une stimulation visuo-motrice synchrone (Kokkinara *et al.*, 2014). L'illusion est plus forte dans un état de mouvement actif que dans un état passif, ce qui indique que l'information à la fois efférente et afférente (proprioception) contribue à la perception corporelle (Raz *et al.*, 2008 ; Dummer *et al.*, 2009). La rétroaction haptique pendant le mouvement actif contribue également de façon importante au sentiment d'appartenance (Raz *et al.*, 2008).

La rétroaction tactile n'est pas une exigence stricte : regarder un robot androïde (Nishio *et al.*, 2012) ou un corps virtuel (González-Franco *et al.*, 2010 ; Verhulst *et al.*, 2018) se déplacer en synchronie avec ses propres mouvements induit également de l'incorporation. Cela se produit encore lorsqu'il y a des écarts de position et d'orientation entre les parties fausses et réelles du corps, bien que l'effet soit moins fort dans cette dernière condition (Bergström *et al.*, 2016). La stimulation visuo-tactile synchrone permet de surmonter les asymétries spatiales et d'induire une illusion lorsque la main en caoutchouc est placée dans une posture anatomiquement réaliste, mais dans une position différente (Ehrsson *et al.*, 2004 ; Rohde *et al.*, 2011) ou dans une orientation différente (Brozzoli *et al.*, 2012 ; Ionta *et al.*, 2013).

Une stimulation multimodale asynchrone est généralement utilisée comme condition de contrôle dans laquelle aucun sentiment d'appartenance ne devrait survenir puisque le signal d'erreur est trop grand pour déclencher le modèle génératif d'incorporation. Cependant, malgré la grande erreur de prédiction d'un tel modèle d'incorporation, la condition asynchrone n'entraîne pas toujours un sentiment d'appartenance du corps significativement plus faible que la condition synchrone (Hara *et al.*, 2015 ; Kokkinara *et al.*, 2015 ; Pozeg *et al.*, 2015). Ceci confirme le concept d'inférence perceptuelle de la théorie du codage prédictif : en principe aucun signal sensoriel n'est strictement requis et tous les signaux sensoriels peuvent potentiellement activer le modèle d'incorporation. Cependant, certaines modalités peuvent avoir un effet plus fort (i.e. un poids plus important) que d'autres, comme c'est souvent le cas dans l'intégration multisensorielle en général, et en raison des différences de niveau de bruit des signaux.

## **2. Le Soi et l'Autre : cognition sociale**

La notion de cognition sociale fait référence à l'ensemble des aptitudes et expériences émotionnelles et sociales régulant les relations interindividuelles. Les mécanismes sociaux font ainsi appel notamment à la perception sociale liée au traitement de signaux sociaux, à la capacité d'empathie, et à l'imitation (Blakemore *et al.*, 2004). Ces différentes compétences, grâce auxquelles un individu perçoit, conceptualise les actions d'autrui, et y réagit, reposent sur les processus de communication et de détection des émotions, ainsi que sur la capacité mentale d'inférer des états mentaux à soi-même et à autrui (Quesque, 2015 ; Goldman & de Vignemont, 2009). Les mécanismes sous-jacents de la cognition sociale sont donc à la base des interactions entre individus et permettent la compréhension des autres et des interactions avec eux (Galloti & Frith, 2013).

### *2.1. Marqueurs des relations interindividuelles*

Selon Macdonald, trois grands processus interfèrent entre eux lors de nos relations interindividuelles (Macdonald, 2013). La perception des visages, du discours, des gestes, des mouvements sociaux pertinents et la perception des émotions associée à l'empathie émotionnelle/cognitive interagissent avec les éléments ayant trait à la régulation de la cognition sociale, à savoir la conscience de soi, l'autoréflexion, la contextualisation, et la régulation

émotionnelle. Pour mesurer les évolutions de la cognition sociale d'un individu lors de manipulations en neurosciences, divers outils ou tests de mesure sont utilisés.

### 2.1.1. Adaptation du paradigme RHI à l'interaction sociale

Après avoir établi les corrélations comportementales et neuronales des changements multisensoriels dans le sentiment d'appartenance ou d'appropriation du corps induits dans les expériences d'illusion corporelle, l'attention s'est tournée vers les contraintes sociales potentielles, ainsi que les conséquences sociales de ces changements. Le paradigme de l'illusion de la main en caoutchouc a ainsi été élargi à l'implication de la représentation du « soi social corporel ». Des études impliquant les relations interindividuelles ont portées, dans un premier temps, sur les attitudes ethniques implicites de sujets lors d'une expérience adaptée de l'illusion de la main en caoutchouc avec une main d'un groupe ethnique différent (Farmer *et al.*, 2012 ; Maister *et al.*, 2013). Après avoir effectué un test d'association implicite de couleur de peau pour évaluer les attitudes et biais implicites de chaque participant envers les personnes à la peau foncée, une stimulation multisensorielle synchrone a été utilisée pour induire le sentiment qu'une main à la peau foncée leur appartenait, suivie d'une seconde mesure subjective de leurs attitudes implicites. Les participants ont ressenti la main de l'autre couleur comme leur appartenant et ont montré, suite à cette stimulation synchrone, une diminution significative des attitudes implicites négatives à l'égard de la peau foncée, corrélée à la force du sentiment d'appartenance. De la même manière, à l'aide d'un système de réalité virtuelle immersive [Peck *et al.*, 2013], l'expérience d'illusion du changement de corps de personnes à la peau claire dans un corps virtuel à la peau foncée a réduit leur biais ethnique implicite mesuré par un même test d'association implicite ethnique. Pour contrôler les effets de la simple différence perceptuelle entre le corps de l'avatar et le corps réel des participants, dans une autre condition, les participants incarnaient un corps à la peau pourpre, mais cette condition de contrôle n'a pas produit de changements dans les préjugés ethniques.

Bien que nous ne voyions habituellement notre visage que dans des miroirs, dans l'interaction entre individus, la reconnaissance faciale est un élément clé de l'identité personnelle, et donc de la conscience de soi. La capacité de se reconnaître dans le miroir n'a été démontrée que chez un nombre limité d'espèces. Chez les humains, cette capacité semble corrélée à des niveaux plus élevés d'empathie et de comportement altruiste. Cette capacité apparaît vers l'âge de deux ans (Keenan *et al.*, 2003). Sforza et ses collaborateurs (Sforza *et al.*,

2010) ont questionné la malléabilité de la reconnaissance faciale à travers une adaptation du paradigme de la main en caoutchouc. À l'aide de pinceaux identiques, les expérimentateurs ont stimulé les joues de deux participants de même sexe de manière synchrone ou asynchrone. Immédiatement après chaque stimulation, des photos de visage transformées associant le visage de l'un et de l'autre participant pouvant varier de 0 à 100 % du visage des deux sujets ont été présentées. Le rapport en pourcentage entre le visage du sujet et l'autre visage est appelé degré de « morphing ». Il a été demandé à l'un des deux sujets d'évaluer dans quelle mesure chaque photo le représentait lui, ou bien son partenaire. Comme déjà montré pour les mains (Botvinick & Cohen, 1998 ; Slater *et al.*, 2008 ; Tsakiris & Haggard, 2005), le corps entier (Ehrsson *et al.*, 2007 ; Lenggenhager, 2007) et le visage (Tsakiris *et al.*, 2008 ; Tajadura-Jiménez *et al.*, 2012 ; Tajadura-Jiménez *et al.*, 2013), cette différence mineure dans la corrélation multisensorielle peut altérer mentalement la reconnaissance de soi. En effet, l'intégration visuo-tactile issue de la vision du toucher de l'autre visage tout en ressentant le toucher de soi-même devrait se produire seulement dans la condition synchrone. En touchant le visage de sujets qui observaient des contacts simultanés sur le visage d'un partenaire, ils ont montré qu'ils pouvaient induire une nouvelle illusion d'identité personnelle, celle de l'appropriation des traits du visage –*enfacement*–. Les sujets ont rapporté que des images transformées d'eux-mêmes et de leur partenaire contenaient plus de soi que de l'autre seulement après une stimulation synchrone. Cette manipulation a ainsi permis de modifier la reconnaissance de son propre visage par une simple manipulation multisensorielle. Les changements rapides induits par la procédure de Sforza et ses collaborateurs suggèrent que le sentiment d'identité faciale peut être plus malléable qu'on ne le croyait auparavant. De plus, une corrélation positive a été établie entre l'appropriation des traits du visage, les traits empathiques du participant et l'attrait physique que les participants attribuent à leurs partenaires. Cette corrélation suggère que les traits de personnalité modulent le sentiment d'appropriation des traits du visage, qui peut représenter un marqueur de la tendance à être social.

Par conséquent, l'illusion de s'approprier les traits du visage d'autrui a des implications sociales car elle perturbe la frontière entre soi et autrui. D'autres travaux (Mazzurega *et al.*, 2011 ; Paladino *et al.*, 2010) dont la procédure consistait à stimuler la joue de chaque participant pendant que celui-ci regardait la joue d'un étranger être stimulée de la même manière, ont été menées en condition synchrone ou asynchrone. Les auteurs ont constaté que cette procédure de stimulation multisensorielle avait un effet sur la perception corporelle et sociale des autres par les participants. Les sujets exposés à une stimulation synchrone ont

montré une plus grande fusion de Soi-Autruï que les participants exposés à une stimulation asynchrone. Le degré de fusion a été déterminé en mesurant les sensations corporelles des participants et leur perception de la ressemblance du visage, le jugement des participants sur l'état interne de l'autre et la proximité/affinité ressentie envers l'autre. Les résultats de cette étude montrent comment l'intégration multisensorielle peut affecter la perception sociale et créer un sentiment de similitude à soi.

### 2.1.2. Affinité et relation interindividuelle

La mesure de notre proximité/affinité envers autrui est un marqueur de nos relations interindividuelles. Selon Aron, nous utilisons des relations de proximité pour nous développer en incluant l'autre dans le soi, le soi étant le contenu ou la connaissance de qui nous sommes (Aron *et al.*, 1991). Lorsqu'une personne entre dans une relation interindividuelle avec une autre, elle perçoit que le soi et l'autre commencent à se chevaucher par inclusion des aspects de l'autre dans la représentation de soi. Plus spécifiquement, lorsque l'autre met ses ressources à disposition dans une relation de proximité, cela conduit à croire que ces ressources sont désormais incluses dans le soi. Ces nouvelles ressources conduisent à une plus grande inclusion de l'autre dans le soi en intégrant également les perspectives et les identités de l'autre dans le soi. Aron et ses collaborateurs (Aron *et al.*, 1992) ont ainsi mené plusieurs études démontrant scientifiquement que nous incluons l'autre dans le soi. Ils ont notamment montré que des sujets étaient plus susceptibles de partager équitablement de l'argent avec leurs proches qu'avec un étranger. Le partage des ressources suggérait d'inclure le soi dans l'autre. Dans une autre tâche, les participants devaient décider si certains traits leur appartenaient. Les décisions sur les traits d'un proche ont eu des temps de réaction plus longs que les décisions sur les traits d'un étranger. Il a été suggéré que la confusion accrue entre le soi et l'autre, lorsque l'autre est un proche, était directement liée à l'intégration de l'autre dans le soi. Ainsi, le degré de proximité dans la relation affecte le soi. À mesure que deux individus se rapprochent, il y a une plus grande confusion et donc un temps de réaction plus long. En conséquence, à mesure que la proximité d'une relation augmente, il y aura une plus grande inclusion de l'autre dans le soi. Aron et ses collaborateurs ont développé une échelle de mesure de l'inclusion Soi-Autre (échelle de l'IOS), un des outils les plus fréquemment utilisés pour évaluer ce phénomène (Aron *et al.*, 1992). L'échelle se compose de sept paires de cercles qui varient au niveau du chevauchement entre le soi et l'autre. Il est demandé aux répondants de choisir la paire de cercles qui représente le mieux leur relation actuelle. De nombreuses études ont montré que cet outil de mesure est

efficace pour obtenir des représentations précises de la proximité/affinité et de l'inclusion d'autrui chez un individu (par exemple, Paladino *et al.*, 2010 ; Ma *et al.*, 2016).

## 2.2. *Les mécanismes de cognition sociale et la résonance miroir*

La perception sociale, c'est-à-dire la perception d'indices chez d'autres personnes indiquant leurs états mentaux comme les expressions faciales, est influencée par la conscience corporelle. Depuis Lipps (1900), il a été suggéré à maintes reprises que lorsque nous percevons les actions d'autres personnes, nous simulons ou réactivons mentalement leurs mouvements corporels (Gallese, 2001 ; Goldman, 2006). Ceci a été suggéré au niveau électrophysiologique chez le singe par l'identification des systèmes de neurones miroirs des actions par Rizzolatti et ses collaborateurs (pour une revue, Rizzolatti, *et al.*, 2007 ; Rizzolatti & Sinigaglia, 2008). Les neurones miroirs sont des neurones corticaux spécifiques qui s'activent aussi bien quand on exécute une action que lorsqu'on regarde un individu exécuter cette même action. Ces mécanismes de résonance motrice ont été également étudiés expérimentalement chez l'être humain en neurophysiologie et par imagerie cérébrale. Ces travaux suggèrent que le « système miroir », chez l'homme peut être localisé dans l'aire de Broca et dans le cortex prémoteur et le lobe pariétal inférieur (Rizzolatti & Sinigaglia, 2008). Une étude de Mukamel et ses collaborateurs (Mukamel *et al.*, 2010) a montré que les neurones situés dans les régions médianes frontale et temporale, notamment dans l'aire motrice supplémentaire et dans l'hippocampe, sont aussi impliqués dans les mécanismes de résonance motrice, suggérant ainsi l'existence d'un réseau neuronal miroir, beaucoup plus étendu que celui précédemment décrit.

Des réseaux corticaux partagés ont également été trouvés pour l'empathie. Des études d'imagerie cérébrale ont montré un chevauchement de régions d'activité cérébrale lorsque les sujets ressentent de la douleur et lorsqu'ils voient un autre individu dans la douleur (Singer *et al.*, 2004), lorsqu'ils se sentent touchés et lorsqu'ils voient un autre individu être touché (Keysers *et al.*, 2004), lorsqu'ils inhalent des odeurs dégoûtantes et lorsqu'ils observent des visages dégoûtants et expressifs (Wicker *et al.*, 2003).

## 2.3. *La représentation corporelle : « le soi social corporel »*

Ce qui rend la résonance motrice et affective particulière, c'est qu'elle va au-delà du simple partage conceptuel. On ne partage pas la connaissance abstraite de l'action ou de

l'émotion observée ; on partage ce qu'on pourrait appeler la connaissance incarnée ou la connaissance dans un format corporel. Farmer & Tsakiris ont défini un « soi social corporel » comme première forme d'individualité où le soi est représenté comme un objet dans le monde, exposé aux perceptions des autres (Farmer & Tsakiris, 2012). En tant que telle, cette forme d'individualité exige également la représentation des autres comme ayant leur propre perspective séparée de celle du soi. Fait important, le soi social corporel, comme le soi phénoménologique, est supposé dépendre d'une forme corporelle de la conscience de soi et de la théorie de l'esprit. En d'autres termes, le soi social corporel repose sur la reconnaissance que son propre corps peut être l'objet des perceptions des autres et donc que les corps des autres sont, comme le sien, porteurs d'une perspective en première personne. Les recherches récentes sur la cognition sociale ont mis l'accent sur le corps compte tenu de l'importante contribution à la cognition apportée par les liens corporels entre perception et action (Barsalou *et al.*, 2010). La découverte de « neurones miroirs » dans les zones motrices, somatosensorielles, et affectives du cerveau revêt une importance particulière pour le rôle du corps dans la cognition sociale, permettant ainsi d'envisager que le comportement, les sensations, et les émotions des autres, observés du point de vue de la troisième personne, peuvent être représentés de la même manière que ses propres actions, sensations et émotions, ressenties à partir d'une perspective en première personne, expliquant ainsi un certain nombre de capacités sociales comme l'imitation et l'empathie (Gallese *et al.*, 2009).

L'approche incarnée de la cognition sociale suggère ainsi que la façon dont nous percevons le corps d'autrui par rapport à son propre corps joue un rôle crucial dans le traitement sociocognitif (Serino *et al.*, 2009). La perception des états corporels d'autrui peut activer des états similaires du soi corporel, ce qui implique que les représentations de notre propre corps et celles d'autrui peuvent partiellement se chevaucher. Cela suggère que ces représentations partagées du corps forment la base fondamentale de l'empathie, de notre compréhension des émotions et des actions des autres. Selon Farmer et Tsakiris (2012), l'étude détaillée du soi social corporel peut éclairer la relation entre les représentations partagées telles que celles induites par le « système miroir » et le soi phénoménologique corporel, mais aussi, comment les interactions sociales contribuent et développent le sens du soi social corporel des individus en interaction. Concernant les représentations partagées entre le soi et les autres, le concept de « soi social corporel » peut éclairer la question du niveau de représentation de soi nécessaire dans la capacité à faire correspondre l'action de soi et celle des autres. Le « système miroir » est considéré comme faisant correspondre notre perspective à la troisième personne du corps

des autres à notre perspective à la première personne de notre propre corps (Gallese, 2009). Pour que cela soit possible, il est nécessaire d'avoir la capacité de se représenter son corps implicitement à partir d'une perspective à la troisième personne vers son propre corps (i.e. en termes allocentriques) (Farmer & Tsakiris, 2012).

De manière intéressante, l'activation des représentations corporelles partagées est modulée selon l'appartenance ou la non appartenance au groupe de la personne observée. Par exemple, lorsque nous observons un individu d'une ethnie différente éprouver un état corporel spécifique, tel que le toucher ou la douleur, nous montrons un partage réduit de cet état corporel (Xu *et al.*, 2009 ; Serino *et al.*, 2009). Plus récemment, la malléabilité potentielle de nos préjugés sociaux a été étudiée (Maister *et al.*, 2013 ; Farmer, 2014 ; Farmer & Maister, 2017 ; Banakou *et al.*, 2016). Cette malléabilité montre que les changements dans la représentation mentale de notre propre corps affectent la similitude perçue entre notre propre corps et celui d'un autre groupe, entraînant des changements significatifs dans les biais implicites. Récemment, Maister et ses collaborateurs (2014) ont proposé que ces changements étaient induits par un processus d'auto-association qui a d'abord lieu dans le domaine physique, corporel par une augmentation de la similitude physique perçue entre soi-même et un membre extérieur au groupe (Maister *et al.*, 2014). Cette auto-association s'étend ensuite au domaine conceptuel, conduisant à une généralisation des associations positives semblables à soi au groupe extérieur.

Comme discuté précédemment, au-delà de l'homéostasie, l'intégration de signaux extéroceptifs et intéroceptifs est nécessaire pour la cohérence de la conscience corporelle de soi. Tsakiris met l'accent sur l'intéroception qui joue, selon lui, un rôle critique dans la cognition sociale. Se lier aux autres en tant qu'individus distincts de soi-même exige la co-représentation simultanée mais distincte de soi et des autres (Tsakiris & Critchley, 2016). Selon Tsakiris, la conscience intéroceptive semble stabiliser la représentation mentale de soi comme distincte des autres. Une compréhension du rôle de l'intéroception dans la représentation des autres par rapport à nous-mêmes est essentielle pour déterminer son importance dans la cognition sociale.

#### 2.4. *Réseaux neuronaux*

D'après l'article de synthèse de Decety portant sur les observations cliniques de patients atteints de lésions cérébrales, des lésions du cortex préfrontal peuvent causer une détérioration sévère du comportement interindividuel, et même en ce qui concerne l'empathie

et la sympathie (Decety, 2010). Ainsi, une empathie réduite est observée dans diverses études suite à des dommages de l'hémisphère droit, principalement lorsque les lésions se situent dans les régions ventro-médianes et orbitaires (Shamay-Tsoory *et al.*, 2005). Un déficit au niveau de l'empathie cognitive –capacité de se représenter les états mentaux d'autrui– est associé aux lésions ventro-médiales tandis qu'un déficit au niveau de l'empathie émotionnelle –capacité à ressentir les émotions d'autrui– est associé à une lésion du gyrus frontal inférieur gauche/insula) (Shamay-Tsoory *et al.*, 2009). Une altération du cortex préfrontal médian et cingulaire est en principe associée à des déficits au niveau de l'interaction sociale et des émotions liées à la conscience de soi. Les patients porteurs de ce type de lésions peuvent devenir apathiques, indifférents à l'environnement et inaptes à se concentrer sur des tâches comportementales et cognitives. Il a aussi été émis l'hypothèse que les dommages frontaux nuisent à la capacité de contextualisation, un élément décisif de la compréhension empathique (Price *et al.*, 1990). En définitive, les études en neuropsychologie montrent le rôle clé du cortex médian et orbitofrontal dans les émotions sociales, y compris l'empathie et la sympathie. Ces études mettent en évidence l'existence de dissociations entre la capacité à ressentir les émotions d'autrui –lésions sous-corticales et temporales–, la capacité à les comprendre –lésions préfrontales–, et à y répondre de manière socialement appropriée –lésions frontales orbitaires et cingulaires– (Hornak *et al.*, 2003).

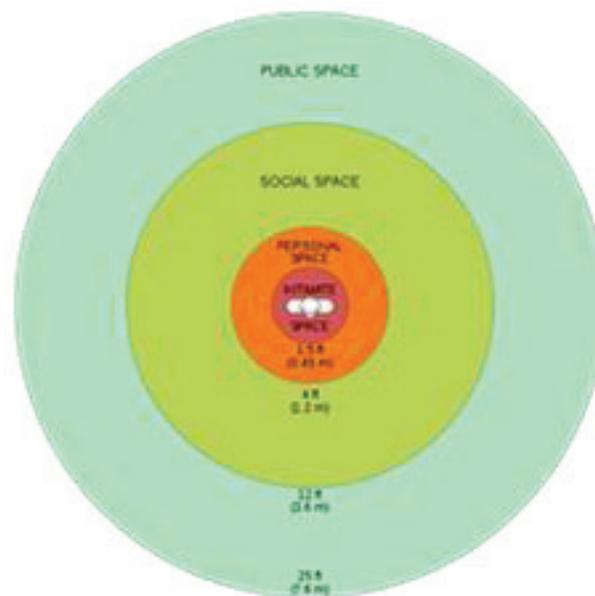
### **3. Soi-Autrui et les Espaces personnels**

Au-delà de l'espace corporel, l'espace péripersonnel –une représentation hautement plastique qui intègre des stimuli tactiles et visuels présentés sur et près du corps– peut aussi éclairer notre relation à nous-mêmes et aux autres. Comment s'articulent les frontières du corps, le domaine du soi et le domaine des autres ?

#### *3.1. Caractéristiques générales et neuroanatomiques des espaces personnels*

Pour guider le mouvement du corps dans son espace environnant, le cerveau doit constamment surveiller la position et le mouvement du corps par rapport aux objets voisins. Ce « pilotage » du corps se doit d'être efficace pour éviter ou manipuler des objets dans la poursuite d'objectifs comportementaux (Holmes & Spence, 2004). Or, nous percevons l'espace qui nous

environne comme continu et unitaire, en référence à l'espace en trois dimensions repéré par des coordonnées cartésiennes. Mais, cet espace résulte de « l'espace perceptif » et il est composé de différentes représentations neuronales, chacune construite en relation avec le comportement que nous pouvons effectuer dans l'environnement (Farnè *et al.*, 2005). En 1966, Hall (Hall, 1966) avait proposé une subdivision en plusieurs zones de l'espace où se déroulent les interactions entre les êtres humains, entre eux et avec l'environnement (Figure 1-12). Dans une optique orientée cognition sociale, il a conceptualisé les zones suivantes : l'espace intime (0-45 cm), l'espace personnel (45-120 cm), l'espace social ou distance interpersonnelle (120-365 cm) et l'espace public (365-762 cm).



*Figure 1-12 : Carte illustrant les distances interpersonnelles chez l'Homme telles que conceptualisées par l'anthropologue américain Edward T. Hall (1966), représentées en mètre et en pied.*

Suite aux diverses avancées sur la compréhension des interactions entre primates non-humains ou humains avec leur environnement, cette représentation de l'espace avec lequel nous interagissons peut se subdiviser, selon un critère sensorimoteur, en trois parties : l'espace corporel ou personnel, l'espace péripersonnel et l'espace extra-personnel. **L'espace corporel** correspond au corps à proprement parler. Dans cet espace, les événements sensoriels peuvent être représentés selon le prisme des actions (schéma corporel) ou selon le prisme de la perception (image corporelle). La représentation de cet espace personnel, occupé par le corps lui-même, est principalement construite via des informations proprioceptives et tactiles, mais également avec la contribution de l'entrée visuelle sur des parties du corps dans l'espace. **L'espace péripersonnel** est l'espace situé directement autour du corps et par le biais duquel

nous pouvons interagir avec des objets de l'environnement. C'est une représentation fonctionnelle de notre espace environnant dans laquelle les objets sont à notre portée. Cet espace a été mis en évidence par des enregistrements électrophysiologiques qui ont montré des réponses unitaires, associées à cette zone, dans le cortex moteur ventral (Rizzolatti *et al.*, 1981), les aires ventrales intrapariétales (Duhamel *et al.*, 1998) et le cortex pariétal postérieur (Avillac *et al.*, 2005), chez le singe. L'espace péripersonnel rend possible deux fonctions élémentaires (de Vignemont & Iannetti, 2015) : la protection du corps et la réalisation d'actions dirigées dans un but précis comme les comportements d'approche, par exemple en vue d'une reproduction. L'espace péripersonnel, principalement basé sur l'intégration des informations tactiles et visuelles provenant du corps et l'espace immédiatement autour du corps, constitue une interface privilégiée pour le corps d'interagir avec des objets à proximité. **L'espace extra-personnel** est l'espace par le biais duquel nous interagissons avec l'environnement de façon plus indirecte (balayage oculaire), cette zone est davantage éloignée du sujet et ne peut pas être atteinte directement par le corps (Rizzolatti *et al.*, 1983). Cet espace extra-personnel est basé principalement sur des entrées visuelles et auditives qui transmettent des informations de l'espace éloigné. Les événements sensoriels sont eux représentés, soit dans un référentiel egocentrique (centré sur le soi), soit dans un référentiel allocentrique (par rapport à l'environnement externe) (Riva, 2014). Ces trois espaces sont intriqués l'un dans l'autre, de formes pseudo-circulaires (Hecht *et al.*, 2019) et avant tout centrés sur le corps ; leurs dimensions diffèrent selon les études.

Des études en imagerie par résonance magnétique ont cherché à localiser les régions neuronales associées à l'espace péripersonnel. Ainsi, une expérience dérivée du paradigme de la main en caoutchouc (Ehrsson *et al.*, 2004) montre que le sentiment illusoire d'appartenance du bras est en lien avec une activité neuronale au niveau du cortex prémoteur ventral. Notre capacité à interagir avec l'environnement immédiat dépend non seulement d'une représentation adéquate de l'espace extérieur, mais aussi de notre capacité à représenter l'emplacement des objets par rapport à notre propre corps et surtout à nos mains. Une autre étude d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (Makin *et al.*, 2007) a permis de localiser dans le sillon intrapariétal et le lobe occipital latéral les régions neuronales qui représentent l'espace périmain lorsqu'une balle en mouvement se déplace près ou loin des mains du participant.

En plus du sillon intrapariétal et du cortex prémoteur, l'insula et les noyaux gris centraux, ainsi que d'autres structures sous-corticales comme le putamen contribuent à l'intégration des stimuli visuels et sensoriels (Gentile *et al.*, 2011). Les activations au niveau des aires pariétales

et prémotrices nécessitent qu'il y ait congruence entre les informations visuelles et proprioceptives (Gentile *et al.*, 2013). D'autres études en neuroimagerie et neurophysiologie ont montré que la représentation mentale de l'espace péripersonnel est mise en œuvre par des réseaux de neurones spécifiques des cortex pariétal et prémoteur, qui intègrent les stimuli tactiles combinés aux stimuli visuels et auditifs provenant d'objets externes, lorsque ces derniers approchent du corps (Macaluso & Maravita, 2010). L'étude chez les primates non humains montre que l'intégration multisensorielle est rendu possible par ces réseaux de neurones qui construisent une représentation spatiale de l'environnement dans lequel le corps a la possibilité d'entrer localement en contact avec les objets (Cléry *et al.*, 2015, 2017).

### 3.2. *Plasticité de la représentation corporelle dans la perception de l'espace péripersonnel*

La découverte chez le singe de neurones corticaux bimodaux, capables d'étendre leur champ récepteur visuel ou tactile dans le cortex pariétal –après une période d'entraînement à l'utilisation d'un râteau pour récupérer des morceaux de nourriture placés à distance– a ouvert des perspectives expérimentales concernant les mécanismes neurophysiologiques à l'origine de notre capacité à étendre les limites sensibles de notre corps naturel. Les études chez l'Homme sur l'utilisation d'outils, montrant des changements d'interactions multisensorielles dans l'espace péripersonnel de sujets sains et de patients neurologiques, ont été considérés comme des preuves que l'utilisation d'outils modifie le schéma corporel (par exemple, Cardinali *et al.*, 2009). La représentation du corps et de l'espace péripersonnel sont apparus extrêmement malléables lors d'expériences dédiées à l'étude de la plasticité du schéma corporel liée à l'utilisation d'outils (par exemple, Maravita & Iriki 2004; Johnson-Frey, 2003). Ces auteurs ont proposé que l'extension de l'espace péripersonnel après l'utilisation d'outils reflétait la modification du schéma corporel, l'outil étant incorporé comme une partie du corps (Critchley *et al.*, 1979 ; Maravita *et al.*, 2006). C'est cette malléabilité qui semble être à l'origine du chevauchement potentiel des concepts de schéma corporel et d'espace péripersonnel (Cardinali *et al.*, 2009).

Chez l'homme, des études neuropsychologiques (Farnè & Làdavas, 2000; Maravita *et al.*, 2001) et psychophysiques (Holmes & Spence, 2004 ; Maravita & Iriki , 2004; Serino *et al.*, 2007) ont démontré, qu'après avoir utilisé un outil, les interactions intermodales entre les stimuli visuels ou auditifs présentés dans l'espace lointain –plus spécifiquement à l'endroit où l'outil a

été utilisé— et les stimuli tactiles à la main augmentent, suggérant une extension de la représentation de l'espace péripersonnel. Ces résultats suggèrent que l'étendue de la représentation de l'espace péripersonnel est façonnée dynamiquement en fonction de l'expérience, étendant les possibilités d'action du corps au-delà de ses limites structurelles (Maravita & Iriki, 2004 ; Gallese & Sinigaglia, 2010 ; Costantini *et al.*, 2011). Certaines de ces études suggéraient qu'une utilisation active de l'outil était nécessaire pour étendre la représentation de l'espace péripersonnel. Cependant, des études ultérieures ont montré qu'aucune interaction physique ou fonctionnelle entre l'espace proche et lointain n'est nécessaire pour étendre la représentation de l'espace péripersonnel (Bassolino *et al.*, 2010 ; Serino *et al.*, 2015). Cette dernière étude (Serino *et al.*, 2015) soutient l'hypothèse, générée par un modèle de réseau de neurones, selon laquelle la plasticité dans la représentation de l'espace péripersonnel après utilisation de l'outil ne dépend pas strictement de la fonction de l'outil ni des actions effectuées avec mais est déclenchée par le retour sensoriel de l'utilisation de l'outil, c'est-à-dire la stimulation tactile synchrone de la main, due à la tenue de l'outil, et la stimulation multisensorielle (auditive ou visuelle), depuis l'espace lointain où l'outil est utilisé.

Afin de mesurer les changements de la représentation du corps, plus particulièrement de l'avant-bras, plusieurs auteurs utilisent une tâche dite de bissection d'avant-bras dans laquelle il est demandé au participant, alors qu'il a les yeux bandés, de pointer avec son index gauche le point qu'il estime comme étant le milieu de son avant-bras droit (Sposito *et al.*, 2012 ; Bartolo *et al.*, 2014). Les expériences menées avec ce paradigme montrent qu'une modification de l'espace péripersonnel —un agrandissement par le biais d'outil prolongeant le bras afin d'interagir avec des objets habituellement hors d'atteinte— provoque un changement dans la représentation du bras qui est alors perçu comme plus long, c'est-à-dire que le milieu de l'avant-bras du participant est perçu comme étant plus éloigné de lui-même (Cardinali *et al.*, 2009 ; Sposito *et al.*, 2018). D'Angelo et ses collaborateurs (2018) ont formulé l'hypothèse selon laquelle la plasticité du schéma corporel dépend du sentiment d'agentivité. Pour tester cette hypothèse, ils ont mis en place deux expériences dans lesquelles l'évolution du schéma corporel et l'espace péripersonnel des participants étaient évalués avant et après une tâche de contrôle d'événements à partir d'actions volontaires dans un espace virtuel. Dans cette série d'expérience, le schéma corporel des participants est évalué par la tâche de bissection d'avant-bras comme décrite ci-dessus avant et après la tâche d'agentivité. L'espace péripersonnel du participant est, quant à lui, quantifié par une « *Reaching distance estimation task* ». Dans cette tâche, une balle est contrôlée par l'expérimentateur grâce à une commande linéaire à vitesse

constante. Cette balle s'approche ou s'éloigne du participant. Le participant doit stopper la balle lorsqu'il estime qu'il peut la saisir, la balle avançant vers le participant et, inversement, lorsqu'il estime qu'il ne peut plus la saisir, la balle s'éloignant du participant. Cette mesure est effectuée, comme pour la tâche de bissection d'avant-bras, avant et après la tâche d'agentivité. Dans la tâche d'agentivité, les participants doivent saisir un objet dans un espace virtuel qu'ils peuvent voir grâce à un écran placé devant eux, au bout d'une table, alors que leur vrai bras droit est masqué. Il résulte de cette expérience que l'espace péripersonnel du participant tout comme la représentation de son bras varient suivant la disposition de l'écran. Si l'écran est placé proche du participant, le bras comme l'espace péripersonnel du participant sont perçus comme étant plus petit. Inversement, si l'écran est éloigné du participant, son espace péripersonnel et son bras sont perçus comme étant plus grand. Ce résultat est davantage significatif pour les sujets ayant obtenus un haut score d'agentivité, lorsque les mouvements de leur vraie main et de la main virtuelle se font de manière simultanée.

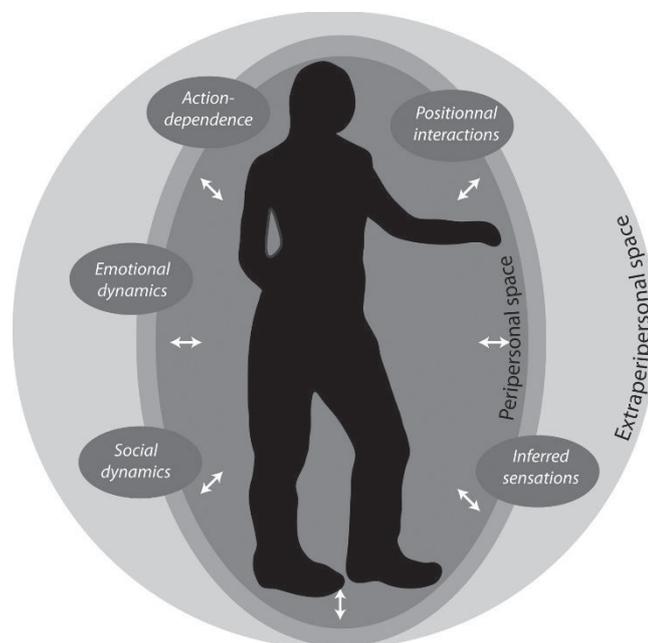
En allant du domaine de soi au domaine des autres, d'autres auteurs montrent que la présence et l'interaction avec autrui façonnent la représentation spatiale péripersonnel (Teneggi *et al.*, 2013). Si nous comparons les mesures de l'espace péripersonnel lorsque des sujets font face à autrui ou à un mannequin placé dans l'espace lointain, les limites de l'espace péripersonnel se rétrécissent lorsque les sujets font face à une autre personne, suggérant que notre espace péripersonnel s'adapte en présence des autres. L'espace péripersonnel est façonné par l'évaluation du comportement d'autrui pendant l'interaction, il existe donc un lien direct entre la représentation péripersonnelle et les sentiments générés par l'interaction avec les autres. Par conséquent, la représentation de l'espace péripersonnel est sensible à la modulation sociale, montrant un lien entre le traitement sensorimoteur de bas niveau et la cognition sociale de haut niveau. Cependant, l'expansion et la contraction de notre représentation de l'espace péripersonnel peuvent ne pas être le seul changement induit par la présence des autres. Certaines études suggèrent que nous réorganisons les expériences sensorielles et motrices observées chez autrui sur nos propres représentations corporelles. En effet, il a été démontré l'activation du système de neurones miroirs similaires chez les primates humains et non humains lorsque nous sommes nous-mêmes touchés, lorsque nous voyons une autre personne touchée, et aussi lorsque des événements se produisent dans l'espace proche du corps de l'autre (par exemple, Keysers & Gazzola, 2009; Cardini *et al.*, 2010).

Des études récentes se sont intéressées au lien entre l'espace péripersonnel de l'action et l'espace interpersonnel. Ce dernier est l'espace dans lequel nous maintenons une distance autour

de notre corps et dans lequel toute intrusion d'autrui peut causer de l'inconfort. Cet espace peut être modifié par des interactions émotionnelles et socialement pertinentes. Comme nous l'avons vu précédemment, l'espace péripersonnel est également modulé par certains facteurs sociaux mais aussi par des informations sociales plus complexes telles que la moralité perçue d'une autre personne, l'âge et le genre (Iachini *et al.*, 2016). L'espace péripersonnel pour agir et l'espace interpersonnel ont un caractère moteur commun et sont sensibles, à des degrés divers, à la modulation sociale. Par conséquent, le traitement social semble incarné et ancré dans le corps agissant dans l'espace (Iachini *et al.*, 2014). En utilisant un paradigme dans lequel les participants ont observé un marcheur les approchant de différentes directions et passant près d'eux à différentes distances de leur épaule droite ou gauche, Quesque et ses collaborateurs (2016) ont constaté qu'une distance interpersonnelle confortable est liée à la représentation de l'espace péripersonnel. En conséquence, l'augmentation de l'espace péripersonnel grâce à l'utilisation d'outils a pour conséquence immédiate que la distance interpersonnelle confortable d'une autre personne augmente également, ce qui suggère que l'espace de confort interpersonnel et l'étendue de l'espace péripersonnel partagent une nature motrice commune (Iachini *et al.*, 2014, 2016 ; Coello & Fischer, 2015).

En 2018, Coello et ses collaborateurs ont développé une expérience permettant d'évaluer l'espace péripersonnel et la représentation du bras du sujet avant et après une tâche dans laquelle le participant doit sélectionner et saisir, par le biais d'un espace virtuel, plusieurs objets disposés différemment les uns par rapport aux autres. Ils formulent l'hypothèse selon laquelle la disposition et la distribution de ces objets et le contexte social ont un effet sur l'évolution de la représentation du corps et de la perception de l'espace péripersonnel après la tâche. La première expérience est focalisée sur la disposition des items à travers l'espace environnant. Les objets sont disposés dans deux espaces d'un échiquier, un espace proximal et un espace distal. Les objets dits « cibles » correspondent aux objets que le sujet doit sélectionner parmi un ensemble. Pour un groupe de participants, les cibles sont distribuées plus dans l'espace distal que l'espace proximal, il en va inversement pour l'autre groupe. Concernant le groupe contrôle, la distribution est la même dans les deux espaces. Les participants ont pour tâche de juger s'ils peuvent ou non atteindre les cibles. Les résultats montrent que, pour le groupe dont les cibles sont distribuées majoritairement dans l'espace proximal, il y a rétrécissement de l'espace péripersonnel des sujets. La distance évaluée lors de la tâche de jugement perceptif d'atteignabilité « *reaching distance estimation* » à partir de laquelle ils considèrent qu'ils peuvent saisir ou ne plus saisir la balle sur le tapis roulant est devenue plus courte après la tâche

de sélection d'objets. Inversement, il est observé que, pour le groupe dont les cibles sont distribuées majoritairement dans l'espace distal, il y a agrandissement de cette distance. La deuxième expérience se focalise sur le contexte social avec deux situations dite de « contrôle social » ou de « coopération sociale ». Chacune des passations expérimentales mettent en jeu deux participants. Pour la tâche de contrôle social, les participants sont en concurrence l'un contre l'autre alors qu'ils doivent coopérer dans la tâche de coopération sociale. Les espaces péripersonnels des participants se chevauchent. Les résultats, suite à la tâche de jugement perceptif d'atteignabilité, montrent qu'il y a agrandissement de l'espace péripersonnel du sujet lorsqu'il est en situation de coopération avec un autre sujet.



**Figure 1-13 : Espaces autour du corps et facteurs endogène et exogène qui influencent la frontière entre les deux espaces.** L'espace péripersonnel est l'espace qui nous entoure directement et avec lequel nous pouvons interagir directement, tandis que l'espace extrapersonnel est l'espace qui est loin du sujet et sur lequel le corps ne peut pas agir directement. Sous forme de bulle, les facteurs endogène et exogène qui influencent la frontière entre les deux espaces (Figure reproduite de Cléry, J., Guipponi, O., Wardak, C., & Ben Hamed, S. (2015). *Neuronal bases of peripersonal and extrapersonal spaces, their plasticity and their dynamics: knowns and unknowns. Neuropsychologia*, 70, p. 319).

En conclusion, la frontière entre les représentations de l'espace lointain et proche est plastique et dynamique, sous l'influence d'une variété de facteurs endogènes et exogènes comme l'illustre la Figure 1-13 (Figure reproduite de Cléry *et al.*, 2015).

## 4. Téléprésence et interaction robotique

Récemment, la science de l'interaction homme-machine a fait des progrès considérables, principalement grâce à des réseaux de neurones artificiels entraînés à la détection d'intention et à l'amélioration de la rétroaction sensorielle (en temps réel, fiable) (Berckele *et al.*, 2018, 2019). Les interfaces homme-machine permettent aujourd'hui d'utiliser des dispositifs robotisés pour étudier et améliorer la cognition humaine (Rognini *et al.*, 2016). Cela transforme les dispositifs robotisés en des outils neuroscientifiques pertinents pour étudier des processus tels que l'adaptation entre un opérateur humain et un dispositif robotisé. La question se pose de savoir de quelle manière cette adaptation module l'incorporation et la cognition incarnée (Wykowska *et al.*, 2016). Les récentes approches en robotique sur les robots humanoïdes et non-humoïdes, notamment les techniques d'incorporation par téléprésence –sentiment d'être présent à un autre endroit que l'emplacement physique de son corps– ouvrent de nouvelles perspectives sur l'étude de la cognition incarnée. De manière complémentaire aux expériences comportementales visant à induire l'incorporation sur une partie du corps virtuelle ou artificielle par la manipulation de contingences multisensorielles ou sensorimotrices (Ehrsson, 2020), l'approche robotique permet d'induire des variations plus systématiques, des délais et des altérations plus flexibles et à plus long-terme. Dans un premier temps, un certain nombre d'études ont porté sur l'incorporation de dispositifs robotiques sur certaines parties du corps (Caspar *et al.*, 2015 ; Romano *et al.*, 2015 ; Hara *et al.*, 2016). Cependant, la possibilité de pouvoir se téléporter virtuellement dans un robot ouvre de nouvelles perspectives pour accéder à des aspects plus globaux du soi (Blanke & Metzinger, 2009 ; Aymerich-Franch *et al.*, 2016 ; Ventre-Dominey *et al.*, 2019).

### 4.1. *Intégration d'artefacts et téléprésence*

Plusieurs études ont adapté le paradigme de l'illusion de la main en caoutchouc dans un environnement virtuel. Dans ces expériences, le sentiment d'appartenance est induit sur une main virtuelle qui est présentée sur un écran ou dans un espace virtuel 3D immersif (Slater *et al.*, 2008 ; Slater *et al.*, 2009 ; Sanchez-Vives *et al.*, 2010 ; Kilteni *et al.*, 2012 ; Ma & Hommel, 2013 ; Pichiorri *et al.*, 2015 ; Ma *et al.*, 2017). L'analyse des questionnaires subjectifs, la mesure de la dérive proprioceptive, et les résultats de l'électromyogramme ont montré que des

participants percevaient de façon illusoire la main virtuelle comme leur propre main. Ces études en environnement virtuel conduisent à la même conclusion à savoir que le sentiment d'appartenance peut être induit sur une main artificielle (virtuelle) mais elles permettent des manipulations plus flexibles que dans la situation classique. C'est ainsi que l'approche en réalité virtuelle a permis de montrer que nous pouvons incorporer plus de « membres » que simplement prescrits par la morphologie de notre corps ou même des corps d'animaux (par exemple, Ehrsson *et al.*, 2009 ; Schaefer *et al.*, 2009 ; Steptoe *et al.*, 2013 ; Ahn *et al.*, 2016 ; Krekhov *et al.*, 2019) bien que la similitude de l'avatar virtuel renforce le sentiment d'incorporation (Maselli & Slater, 2013). Dans des approches plus classiques de stimulation multisensorielle et sensorimotrice synchrone, il est possible d'induire le sentiment d'appartenance sur des parties du corps ou des corps entiers avec une forme, une taille et une symétrie différentes de la forme normale du corps (Longo *et al.*, 2009 ; González-Franco *et al.*, 2010 ; Sanchez-Vives *et al.*, 2010 ; Slater *et al.*, 2010 ; Kilteni *et al.*, 2012 ; Verhulst *et al.*, 2018).

D'autres illusions ont été expérimentées avec succès pour des mains robotiques (Guterstam *et al.*, 2013), des bras robotiques (Aymerich-Franch *et al.*, 2017), des robots humanoïdes et non-humoïdes (par exemple, Nishio *et al.*, 2012, 2018 ; Jazbec *et al.*, 2017 ; Ventre-Dominey *et al.*, 2019). Par conséquent, il semble que les humains peuvent intégrer un large éventail d'objets externes dans leur représentation corporelle. Savoir comment ces artefacts non humains peuvent être incorporés comme une extension phénoménale du soi est clairement pertinent dans le domaine de la téléprésence (IJsselsteijn *et al.*, 2005). La compréhension des conditions dans lesquelles l'intégration peut se produire devrait guider la conception d'environnements virtuels et de systèmes de téléprésence.

Dans ce contexte, il est pertinent de comprendre comment un objet non humain comme un objet robotique peut induire une incorporation (Toet, 2020, pour une revue). Comme nous l'avons évoqué précédemment, un faux corps ou partie de corps n'a pas nécessairement besoin d'être réaliste pour induire une incorporation. Les humains peuvent aussi s'identifier à des androïdes réels (Nishio *et al.*, 2012) ainsi qu'à des robots humanoïdes et non humanoïdes (Aymerich-Franch *et al.*, 2015-2017 ; Ventre-Dominey *et al.*, 2019). Dans le domaine de la robotique, l'incorporation a été induite vers des bras androïdes téléopérés ou des bras de robot, soit par stimulation synchrone visuo-tactile (Aymerich-Franch *et al.*, 2017), ou soit par stimulation synchrone visuo-motrice (Romano *et al.*, 2015 ; Aymerich-Franch *et al.*, 2017). Une illusion de sentiment d'appartenance a été induite avec succès non seulement pour des bras ayant une forte ressemblance avec les bras humains en termes de forme (i.e. une main avec cinq

doigts, Romano *et al.*, 2015) et de texture (Hohwy & Paton, 2010), mais aussi pour des bras d'apparence non humaine. (Aymerich-Franch *et al.*, 2017). Un sentiment d'appartenance et un sentiment d'agentivité du corps entier ont été induits par téléprésence dans des androïdes grande nature se déplaçant en synchronie avec les mouvements des participants (Nishio *et al.*, 2012; Jazbec *et al.*, 2017).

#### 4.2. *Des cerveaux sociaux aux robots sociaux*

Ni totalement objets, ni complètement sujets, les robots marquent dans l'imaginaire une frontière, à mi-chemin entre l'artificiel et l'humain, entre le vivant et le mécanique (Chouteau & Vievard). Depuis longtemps présents dans notre imaginaire à travers les récits de science-fiction, les objets intelligents deviennent une réalité économique au potentiel de développement considérable et les robots compagnons entrent peu à peu dans la vie quotidienne (Belk, 2014). Des chercheurs de différents domaines s'interrogent sur la façon dont les humains perçoivent et interagissent avec ces robots et notamment comment le cerveau humain incorpore des machines intelligentes dans notre milieu social. Au-delà des solutions techniques dédiées aux interactions homme-robot, les robots comme outil d'étude de la cognition sociale, et leur implication dans l'interaction homme-robot est un domaine en plein essor. (Wikowska *et al.*, 2016).

La définition des caractéristiques qui peuvent rendre un robot socialement accepté par les hommes est un défi majeur lors de la construction des robots amenés à fonctionner dans le monde quotidien. Ainsi, lors de la conception d'agents intentionnels, l'apparence d'un robot ainsi que son comportement (Tapus & Mataric, 2006 ; Wykowska *et al.*, 2016, Wiese *et al.*, 2017) doivent nécessairement être questionnés. Les développements en robotique se sont axés sur la similitude des caractéristiques perçues, inspirés des récits de science-fiction et des recherches en science cognitive. Ainsi, des détails anthropomorphes ont été introduits dans le corps et le visage des robots et des avatars, jusqu'à des changements de couleur dans la zone du visage pour simuler les bouffées de chaleur liées aux réactions émotionnelles (Jimenez *et al.*, 2010). En 1970, Mori a défini le concept de « vallée de l'étrange » ou « vallée dérangement » selon lequel le niveau d'acceptabilité d'un robot évolue différemment suivant son degré de ressemblance à un être humain. Plus un robot aura une apparence proche de celle d'un être humain, moins ses caractéristiques qui le différencient de l'être humain auront tendance à être acceptées par un observateur, ce qui pourrait conduire à une réaction de peur ou de rejet. Une

investigation de l'acceptation sociale des robots a été initiée récemment en exploitant les mécanismes cognitifs sous-jacents à l'incorporation (Ventre-Dominey *et al.*, 2019). Cette approche s'appuie, d'une part, sur l'importance de la perspective en première personne dans l'incorporation –observée pour une partie du corps, un corps entier, ou un avatar en réalité virtuelle– et, d'autre part, au-delà des illusions corporelles, sur la perception du soi social corporel –observé par exemple lors d'une illusion d'*enfacement* (Sforza, 2010)– suggérant que des caractéristiques de l'identité d'autrui peuvent être incorporées dans la représentation de soi. Ainsi, il a été mis en évidence qu'une perspective en première personne avec une rétroaction visuo-motrice congruente induit une sensation d'incorporation dans un robot qu'il soit humanoïde ou non-humoïde et augmente significativement l'acceptabilité du robot (Ventre-Dominey *et al.*, 2019).

## 5. Objectifs

De nombreuses expériences ont ainsi été dédiées à l'étude des mécanismes d'intégration multisensorielle impliqués dans la construction du soi. Elles ont permis de montrer que les représentations internes du soi corporel pouvaient être mises à jour par ces différentes entrées sensorielles, qui peuvent les modifier et les réactualiser selon le contexte. De plus, ces études révèlent que la modification de ces représentations internes pouvait s'étendre à notre relation à l'autre, et modifier notre ressenti envers autrui. Récemment, Ventre-Dominey et ses collaborateurs (2019) ont initié des recherches sur les capacités d'incorporation d'un sujet humain dans un robot en situation de téléprésence. Ils se sont intéressés aux changements induits sur la perception du soi au sein d'un robot et sur les sentiments de sympathie et de similitudes physiques et psychologiques envers ce même robot.

Dans la continuation de ces travaux de recherche, ce travail de thèse a pour objectif d'approfondir notre compréhension des mécanismes de représentation du soi corporel et des espaces péripersonnels, lors d'interactions homme-robot. Plus précisément, nous cherchons à déterminer les rôles respectifs des informations sensorielles et motrices dans la plasticité de ces représentations en lien avec la cognition sociale. Plus particulièrement, nous aborderons les questions suivantes :

*1-Quels sont les rôles respectifs des informations motrices vs sensorielles sur le sentiment d'incorporation ?* Sur la base des résultats antérieurs concernant l'incorporation dans les

expériences d'illusion de la main en caoutchouc ou des adaptations de ce paradigme étendu à d'autres parties du corps ou au corps entier, nous conjecturons un effet important de la temporalité de l'induction de l'incorporation, quelle que soit sa modalité visuo-motrice ou visuo-tactile. En référence aux résultats sur l'incorporation lors de l'expérimentation de l'illusion de la main en caoutchouc en version active (Kalckert & Ehrsson, 2012 ; Toët, 2020), nous conjecturons l'émergence d'un sentiment illusoire d'agentivité plus fort en induction motrice qu'en induction tactile.

*2-Quel retentissement sur la cognition sociale ?* Des études antérieures ont montré comment l'incorporation induite par interaction multisensorielle entre individus peut changer positivement les attitudes sociales –proximité, empathie, biais implicites envers des groupes ethniques (Sforza *et al.*, 2010 ; Serino *et al.*, 2009 ; Maister *et al.*, 2013 ; Ma *et al.*, 2016, Tadjadura-Jiménez *et al.*, 2012). Nous conjecturons un effet positif de l'incorporation sur l'attitude sociale envers le robot.

*3-Quel rôle joue la perspective expérimentale - téléprésence robotique vs interaction homme-robot en face-à-face sur le processus d'incorporation ?* Sur la base de la littérature, nous conjecturons un sentiment illusoire d'incorporation plus fort dans une situation de téléprésence robotique face à un miroir, permettant au sujet de voir et de se voir en tant que robot, comparativement à une situation d'interaction face-à-face entre le sujet et le robot.

*4- Quel est l'impact de l'apparence humanoïde ou non du robot sur le processus d'incorporation et la cognition sociale du sujet ?* Sachant que des résultats toujours plus nombreux attestent que le réalisme visuel ou la similarité ne semblent pas nécessaires à l'incorporation (Slater *et al.*, 2009 ; Toët, 2020), ce sentiment illusoire est-il facilité envers un robot humanoïde plutôt que non-humoïde ?

La première étape de ce travail a été de compléter et d'approfondir cette première expérience (Ventre-Dominey *et al.*, 2019) sur les mécanismes d'incorporation robotique induite par manipulations sensorimotrices, dans deux perspectives d'interactions homme-robot, en situation de téléprésence comparée à une situation de face-à-face. En téléprésence, le sujet est téléporté au sein du robot par un dispositif de réalité virtuelle de sorte qu'il ait accès à l'environnement visuel du robot alors qu'un miroir est placé devant le robot. Cette situation expérimentale, qui renvoie au sujet un reflet de lui-même en tant que robot, facilite un processus

d'incorporation par identification. Afin d'étudier les effets du mimétisme moteur proprement dit dans ces interactions homme-robot, nous avons exploré les capacités d'incorporation et les modifications psychologiques qui l'accompagne en situation de face à face entre sujet et robot. En éliminant le miroir et son influence sur l'incorporation, il sera intéressant d'observer si les effets de délocalisation au sein du robot et d'agentivité sont modifiés. Dans ces deux expériences de manipulations visuo-motrices, que ce soit en téléprésence ou en face à face, une analyse de la cinétique des mouvements de tête du sujet a été menée afin de s'assurer du comportement aléatoire de ces mouvements, quelle que soit la corrélation temporelle entre les mouvements, synchrone ou asynchrone.

La deuxième étape de ce travail a été de mettre en œuvre une adaptation de ce même couplage technologique homme-robot afin d'étudier les capacités d'incorporation du sujet dans un robot, mais, en remplaçant le mode d'induction moteur par un mode d'induction tactile : une stimulation sensorielle tactile des deux visages, humain et robot. Deux situations expérimentales ont été testées comme lors de l'induction motrice : deux temporalités de la stimulation tactile, synchrone ou asynchrone entre sujet et robot, et deux perspectives expérimentales, en téléprésence ou en face-à-face lors de l'interaction homme-robot.

La troisième étape a été de mener une analyse globale de ces quatre expériences comme une seule et même expérience d'interaction homme-robot, selon deux temporalités, synchrone et asynchrone, menée en quatre temps, explorant tour à tour, deux modes sensorimoteurs/multisensoriels différents (visuo-moteur et visuo-tactile) et selon deux perspectives d'interaction homme/robot (téléprésence et interaction face-à-face). Cela permet d'explorer les rôles respectifs des informations sensorielles et motrices dans la plasticité de ces représentations et les conséquences de la sensation illusoire d'incorporation dans la perception d'autrui, le robot, lors de l'interaction homme-robot.

La dernière étape de ces travaux a eu pour but de développer des mesures objectives de l'espace péripersonnel et du schéma interne corporel du sujet. Ici, c'est la plasticité de la représentation interne corporelle dans la perception de l'espace péripersonnel qui est étudiée à travers des mesures objectives d'espace atteignable du sujet en situation de téléprésence dans le robot *iCub*. En s'appuyant sur les mesures subjectives d'incorporations utilisées dans les expériences précédentes, nous souhaitons tester une possible corrélation avec ces mesures objectives.



## Chapitre 2 : Techniques de robotique

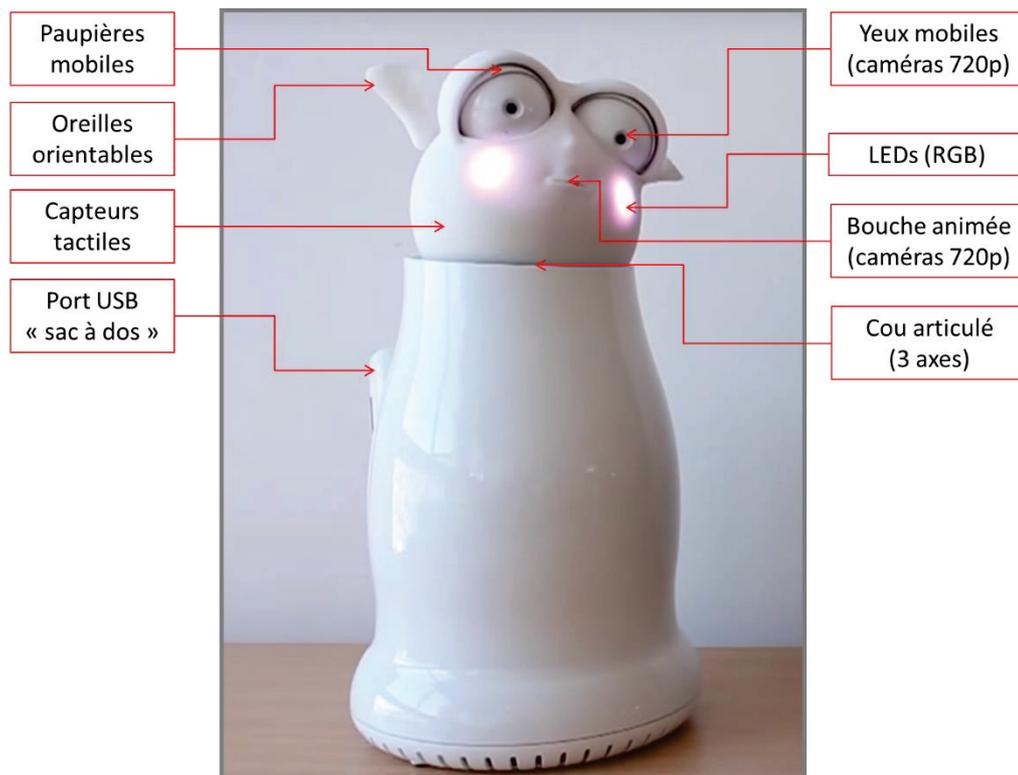
Dans ce chapitre, nous décrirons dans un premier temps le matériel de robotique utilisé lors des expériences, le protocole technique relatif à la mise en route des robots, et leur fonctionnement. Puis, dans une seconde partie, le matériel expérimental, les protocoles relatifs aux différentes expériences, et la méthode d'analyse des données seront explicités.

### 1. Description du matériel robotique

L'étude présentée dans cette thèse a été réalisée avec deux robots expressifs et communicants: le robot *iCub* (Metta, G. *et al.*, 2010) et le robot *Reeti* (Robopec, 83140 Six-Fours-les-Plages- France, <http://www.reeti.fr/index.php/fr/>).

#### 1.1. *Le robot non humanoïde Reeti*

Le robot Reeti (Robopec), présenté dans la Figure 2-1, est un robot sous forme de tête non-humoïde, fantaisiste, ludique et mobile, disposé sur un socle. Le tout mesure 44 cm de hauteur et pèse 4 kg. Les mouvements sont décrits en termes de degrés de liberté (ddl). Ce sont des mouvements rigides que l'on peut décomposer dans l'espace selon 3 ddl de translation cartésienne et 3 ddl de rotation (angles d'Euler). Les 15 degrés de liberté du robot lui permettent des déplacements au niveau du cou selon 3 axes et au niveau de ses deux yeux indépendants selon 2 x 2 axes. Grâce à deux diodes électroluminescentes (*light emitting diode*, LEDs) à 16 millions de couleurs par combinaison de niveaux Rouge-Jaune-Cyan (RGB–Red-Green-Blue) et de deux capteurs tactiles au niveau des joues, des paupières animées, une bouche animée par 4 motorisations (2 commissures et deux lèvres), et des oreilles orientables, il peut réaliser un très grand nombre d'expressions faciales différentes. Ce robot est contrôlé par ordinateur et alimenté par un bloc d'alimentation externe de 100-240 V/AC. Il est, par ailleurs, doté d'une technologie de synthèse vocale.

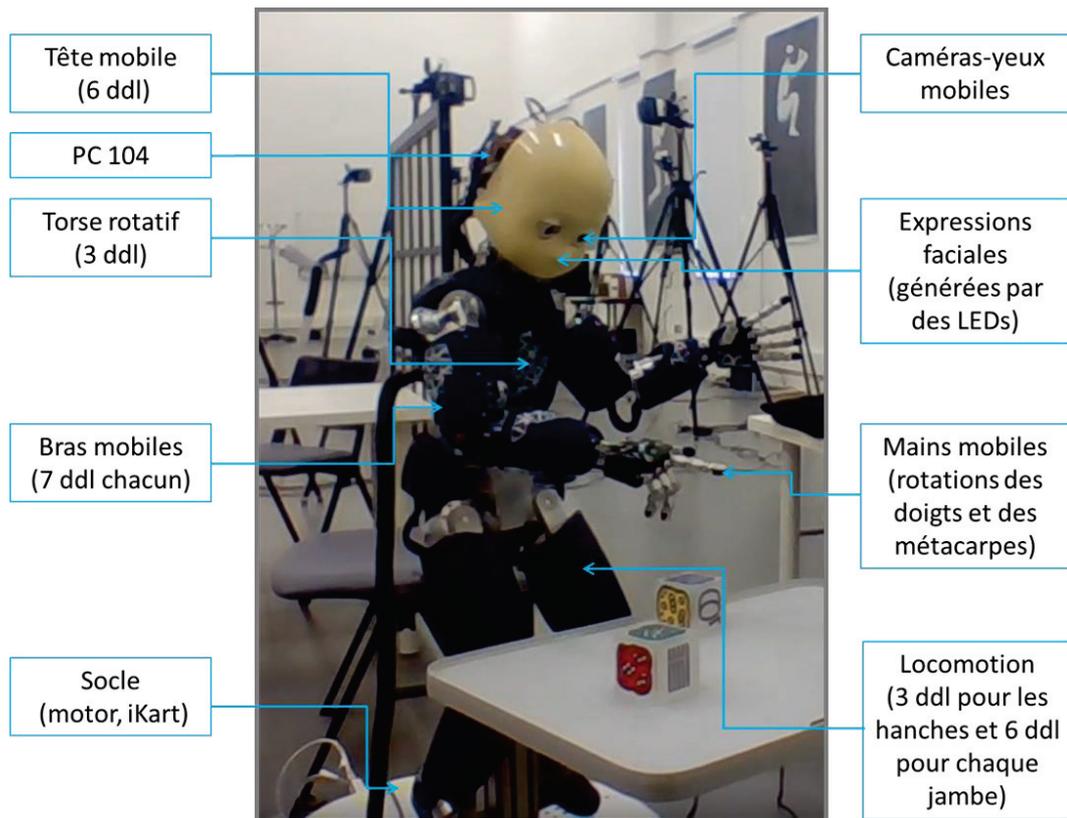


**Figure 2-1 : Photographie et descriptif des éléments du robot Reeti (Robopec), robot non-humanoïde qui mesure environ 44 cm de hauteur.**

Dans chacun de ses yeux, des caméras haute définition (HD) de 1280x720 pixels, contrôlées par l'application *RCamera*, permettent d'enregistrer l'environnement situé de façon directe et ceci de façon précise dans la limite de l'angle de vision que permet ce matériel vidéo intégré.

## 1.2. Le robot humanoïde *iCub*

Le robot *iCub* (IIT, Istituto Italiano di Tecnologia, Genova, Italie) présente une forme humanoïde et mesure environ 104 cm de hauteur. La Figure 2-2 présente une photographie du robot et son descriptif.



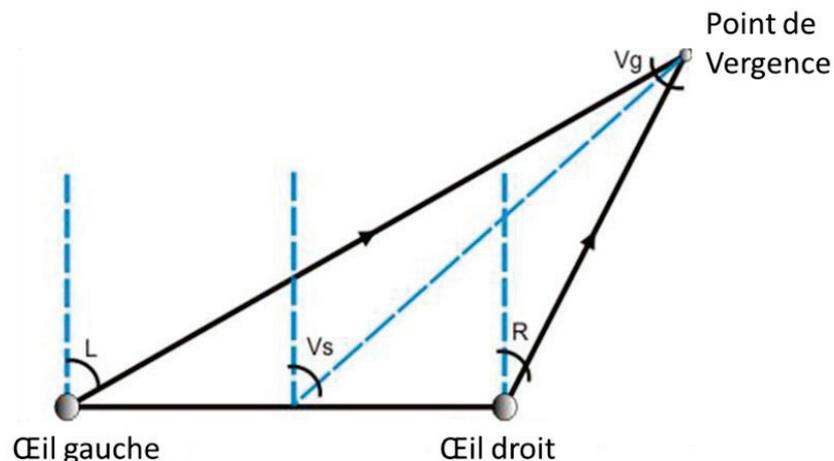
**Figure 2-2 : Photographie et descriptif des éléments du robot iCub (IIT, Istituto Italiano di Tecnologia, Genova, Italie).** Il présente une forme humanoïde et mesure environ 104 cm de hauteur.

Il possède un corps mobile et ses 53 degrés de liberté lui permettent de réaliser de nombreux mouvements catégorisables en 6 classes :

- Les mouvements de tête : 3 ddl pour la rotation dans les plans horizontal, vertical et sagittal.
- Les expressions faciales : elles sont produites à partir des mouvements mécaniques des paupières et de LEDs qui permettent de simuler des expressions faciales au niveau des lèvres, des joues et des sourcils.
- Les mouvements du torse : ce sont des mouvements rigides que l'on peut décomposer en trois rotations (3 ddl).
- Les mouvements des bras (7 ddl pour chacun) : il s'agit de rotations de chaque segment du bras selon trois angles possibles au niveau des articulations de l'épaule (3 ddl), trois angles au niveau du poignet (3 ddl), et un angle au niveau du coude (1 ddl).
- Les mouvements des mains se décomposent en rotations angulaires au niveau des doigts (mouvement d'une ou deux articulations mis à part pour le pouce qui lui est opposable) et des métacarpes.

- Les mouvements des yeux-caméras (3 ddl) : ils sont décrits en termes de rotation des deux yeux, chaque œil est orienté à un temps donné dans la direction du point d'observation appelé point de vergence selon un certain angle par rapport à l'axe orthogonal au visage du robot (droit, gauche). L'angle de vergence est l'angle entre les droites passant par le point de vergence et le centre de chaque œil, l'angle de version est l'angle entre la normale à la face du robot et la droite passant par le point entre les deux yeux sur la face du robot et le point de vergence (Figure 2-3).
- La locomotion (3 ddl pour les hanches et 6 ddl pour chaque jambe) : similairement aux bras, il s'agit de rotations des hanches (2 x 3 ddl), des genoux (2 x 1 ddl) et des chevilles (2x 2 ddl).

Par ailleurs, des caméras situées dans les yeux du robot et, par conséquent, mobiles comme ces derniers, permettent au robot d'explorer la scène visuelle à laquelle il fait face.



**Figure 2-3 :** L'angle de vergence  $Vg$  est l'angle entre les droites passant par le point de vergence et le centre de chaque œil ( $R$ ,  $L$ ), l'angle de version est l'angle entre la normale à la face du robot et la droite passant par le point entre les deux yeux sur la face du robot et le point de vergence

Ce robot fait partie intégrante d'un projet robotique open-source (<https://icub.iit.it/>). Notre plateforme iCub se compose à la fois d'unités matérielles et logicielles :

- La carte autonome du robot, l'*iKart*, qui permet à l'*iCub* d'interagir avec des agents humains et des objets et ceci à une bonne hauteur grâce au socle sur lequel l'*iCub* est posé. Ce socle se compose de moteurs de déplacements en 2D (non utilisé dans les expériences présentées dans ce mémoire), de gestion d'alimentation pour l'*iCub*

incluant des batteries pour un fonctionnement en autonomie, un ordinateur à partir duquel l'*iCub* démarre, de l'*iKart*, ainsi que de ports et des branchements pour les autres composants du système.

- L'*iCub* en lui-même, décrit précédemment, y compris les moteurs qui contrôlent les articulations, le matériel permettant de contrôler ces moteurs, et l'ordinateur PC104 qui supervise toutes les actions sur l'*iCub*. Ce dernier est situé dans la tête du robot *iCub*, son bouton de lancement est situé dans le socle du robot.

Chaque mise en route, arrêt, type d'utilisation et problème rencontré avec le robot est horodaté et renseigné dans le cahier de laboratoire spécifique à l'*iCub*.

Dans ce travail, sera mis l'accent sur les mouvements de tête des robots pour les expériences portant sur l'incorporation et la cognition sociale et sur les mouvements des bras et des mains pour les expériences de mesures objectives.

Dans la suite, nous décrirons le système de suivi des mouvements de tête du robot puis le principe de la plateforme SWoOZ (*Super Wizard of Oz*) (Gibert *et al.*, 2014) qui permet par le biais de la plateforme YARP (*Yet Another Robot Platform*) (Metta *et al.*, 2006) de contrôler le mouvement des robots tout en assurant une interaction homme-robot naturelle et efficace.

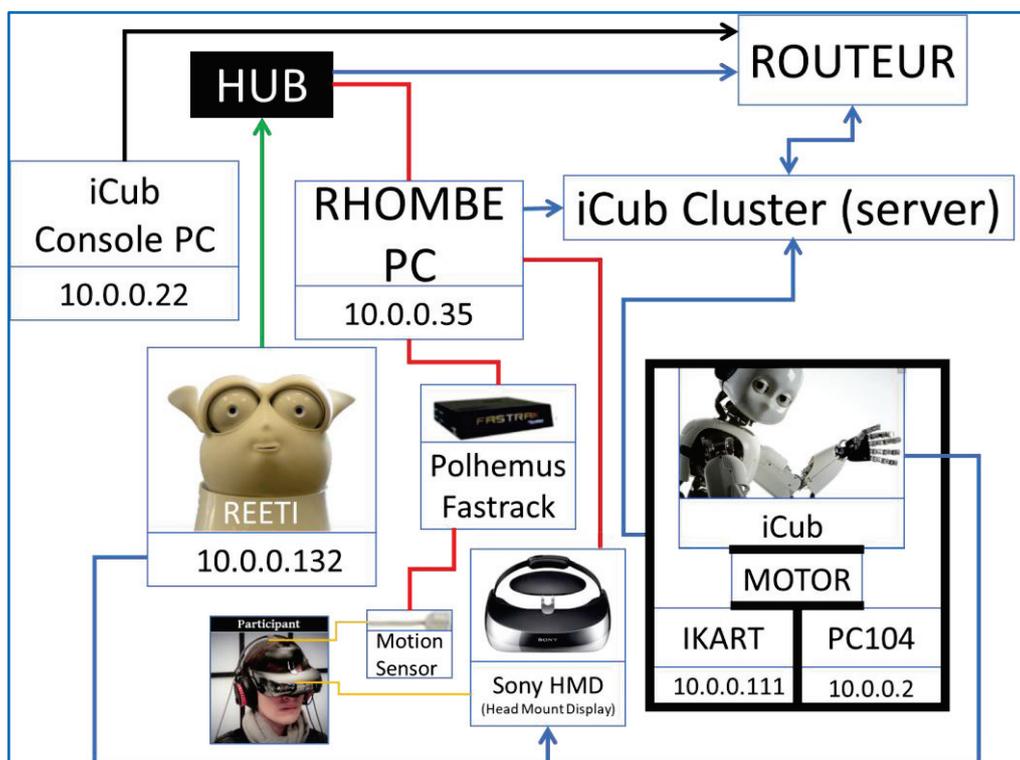
## 2. Principe de la plateforme SWoOZ

Dans les expériences décrites dans cette thèse, le sujet humain est dans un cadre de "Magicien d'Oz" où il contrôle le robot avec ses mouvements, et voit à travers les yeux du robot. Cela nécessite une infrastructure logicielle de pointe pour le contrôle du robot et la transmission de l'entrée visuelle des caméras au casque de réalité virtuelle. Cette technologie est fournie par le système Super Wizard of Oz (SWoOZ). SWoOZ a été développé en laboratoire par Guillaume Gibert dans le cadre d'une ANR - retour de post-doctorant, et est librement accessible au public (<https://github.com/GuillaumeGibert/swooz>).

### 2.1. *Le système de suivi des mouvements de tête*

Sur la Figure 2-4 est représentée, dans le contexte du système SWoOZ, une photographie d'un sujet qui porte un casque de réalité virtuelle Sony HMD (*Head Mounted Display*) avec affichage stéréo (SONY HMZ-3WT 3D Viewer), relié aux caméras insérées dans les yeux du robot, et un casque anti-bruit. Un petit capteur fixé sur le visiocasque HMD a été couplé à un système de suivi de mouvement (*Polhemus Fastrak* TM, 05446 Vermont, USA) situé à

proximité du sujet afin de transmettre les signaux associés aux mouvements de la position de la tête. Ce système de suivi de mouvement *Polhemus Fastrak* (Figure 2-4) est renseigné comme ayant une faible latence ( $\sim 4$  ms) et la latence globale entre le mouvement de la tête du sujet et le mouvement de la tête du robot a été mesurée inférieure à 100 ms (Gibert *et al.*, 2014). Il a une portée opérationnelle d'environ 1,5 m avec un émetteur standard. Lors des mouvements de tête du sujet, les déplacements du capteur de position entraînent des perturbations d'un champ magnétique de faible puissance émis par l'émetteur à 120 Hz. Les signaux issus de l'émetteur sont envoyés au récepteur *Polhemus Fastrack*. Les déplacements du capteur par rapport au récepteur permettent l'enregistrement de la position de la tête du sujet dans les trois plans de l'espace. Le capteur et le récepteur doivent être disposés, tous deux, dans la même direction que l'axe dorso-ventral du sujet (indication par des flèches sur les deux pièces). La capture de mouvement par le biais du système de *tracking Polhemus Fastrack* suit la position en coordonnées cartésiennes (gauche/droite (x), haut/bas (y), avant/arrière (z)) avec une précision de 1 mm et l'orientation en angles d'Euler (Lacet (*yaw*), Tangage (*pitch*), Roulis (*roll*)) avec une précision de  $1^\circ$ .



**Figure 2-4 :** Représentation schématique de la configuration du SWoOZ : Un capteur mesure les mouvements de la tête du sujet qui sont transmis au système de suivi de mouvement *Polhemus Fastrack* ; ensuite, une manipulation en ligne peut être appliquée à n'importe quel paramètre, enfin, le robot reproduit les mouvements du sujet.

## 2.2. *Système d'acquisition des mouvements de tête*

Lors des mouvements de tête du sujet, les déplacements du capteur de position permettent l'enregistrement de la position de la tête du sujet dans les trois plans de l'espace ; le capteur et le récepteur étant disposés, tous deux, dans la même direction que l'axe dorso-ventral du sujet. Par le biais du protocole YARP, les mouvements du sujet, une fois transférés du capteur au récepteur, sont envoyées au système *Fastrack de Polhemus* qui permet de transférer les données en temps réel avec un temps de latence inférieur à 200 ms. Grâce au système SWoOz, les données sont converties sous forme de signaux qui sont alors utilisés pour contrôler les déplacements de tête du robot en condition synchrone.

## 2.3. *Le système Super Wizard of Oz (SWoOz)*

Les robots, *Reeti* et *iCub*, sont utilisés dans les expériences subjectives et le robot *iCub* est utilisé dans l'expérience objective espace-pointage. Ils font partie intégrante d'un système perfectionné appelé SWoOZ (Super Wizard of Oz) qui permet de les contrôler. Ce système SWoOz (Gibert *et al.*, 2014) a été développé à partir du code C++ de la plateforme YARP, sur l'éditeur de code GitHub. Une représentation schématique de la configuration du super Wizard of Oz des expériences décrites dans ce travail est illustrée dans la Figure 2-4. L'objectif du système SWoOz est de permettre à un sujet humain, par le biais du réseau YARP, de contrôler les mouvements d'un robot tout en assurant une interaction homme-robot naturelle et efficace. Comme décrit précédemment et illustré dans la Figure 2-4, le sujet est muni d'un capteur positionné sur un visiocasque qui enregistrent ses mouvements de tête. Grâce au système SWoOz et via le protocole YARP, les données sont converties sous forme de signaux qui sont alors utilisés pour contrôler les déplacements de tête du robot notamment en condition synchrone, c'est à dire lorsque le robot imite en temps réel les mouvements de tête du sujet. À la différence des dispositifs classiques de téléopération supposant une interface de contrôle avec différentes commandes susceptibles d'être actionnées par un opérateur, SWoOz est une plateforme intuitive qui permet au robot humanoïde de répliquer directement et en temps réel les mouvements spontanés des membres supérieurs du sujet, ce qui favorise une interaction naturelle. Plus généralement, la plateforme SWoOZ se compose de capteurs permettant de déterminer les mouvements et d'un logiciel permettant d'appliquer la manipulation en ligne à des paramètres précis et d'un robot.

## 2.4. *La plateforme YARP*

YARP, *Yet Another Robot Platform* (Metta *et al.*, 2006) est une plateforme virtuelle financée par le consortium européen FP6 EU RobotCub et réalisée sous l'éditeur de code libre de droit *GitHub* (<https://www.yarp.it/>). Cette plateforme permet d'interconnecter tous les modules logiciels nécessaires aux différents types d'opération sur les robots. Elle permet notamment à un sujet humain de contrôler les robots par le biais de capteurs de mouvements. Cette plateforme se compose de plusieurs modules dédiés aux différentes interactions homme-robot possible. Tous ces modules sont contrôlés par le YARP *module manager*. Ainsi, YARP permet d'organiser la communication entre les capteurs, les processeurs et les actionneurs de manière à encourager les couplages faibles, ce qui facilite grandement l'évolution progressive du système. YARP comprend un modèle de communication neutre pour le transport, de sorte que le flux de données est découplé des détails des réseaux et protocoles sous-jacents utilisés. Sur YARP, la communication se fait par le biais de connexions entre les entités nommées, appelées ports. Le réseau YARP est un graphique dirigé, où les ports sont les nœuds, et les connexions sont les bords. Chaque port se voit attribuer un nom unique, comme */icub/camera/left*. Chaque port est enregistré par son nom dans un `nameserver`. L'espace `yarpnameserver` est conçu pour être facilement manipulé par les utilisateurs qui n'utilisent pas eux-mêmes les bibliothèques ou exécutables YARP. Un port peut envoyer des données à d'autres ports et peut recevoir des données d'autres ports. Les connexions entre ports peuvent être librement ajoutées ou enlevées, et peuvent utiliser différents transports sous-jacents.

## 2.5. *Protocole technique de lancement de l'expérience*

### 2.5.1. **Lancement et connectivité YARP**

La procédure présentée ci-dessous concerne le robot *iCub* ; le démarrage du robot *Reeti* s'effectuant grâce à un ordinateur dédié. Cette procédure s'exécute principalement via l'ordinateur Linux *iCub Console*. Après la mise en route du réseau *iCub Cluster* depuis le boîtier à côté du PSFP (*Power Supply Front Panel*) permettant de connecter l'ordinateur *iCub Console* à ce réseau, nous procédons à la vérification, dans la fenêtre du Cluster Management (`iCub-cluster.py`), des éléments utiles au déroulement de l'expérience, c'est-à-dire le PC104, l'*iKart* et l'*iCub Console* (Figure 2-4 et 2-5). `iCub-cluster.py` est un script GUI qui permet de démarrer le serveur de noms `yarpnameserver` sur l'ordinateur *iCub-consol* pour

coordonner les ordinateurs *iKart*, *pc104*, *iCub-consol*. Le serveur de noms *yarpnameserver* crée un espace partagé dans lequel les programmes de ces différentes machines peuvent communiquer et interagir. Puis, on exécute *Yarpmanager* et *YarpRobotInterface* afin d'allumer les moteurs du robot *iCub*, et établir la connectivité entre le robot et les autres éléments du réseau. Cela active les moteurs et initie une procédure de démarrage qui vérifie les angles d'articulation pour chaque articulation, et place le robot dans une posture initiale. Sur le PC Rhombe, nous exécutons une autre instance de *Yarpmanager* puis le module *sw-teleoperation.xml* qui fait partie de l'application *SWoOz\_iCub\_demo\_Beaming* afin d'interconnecter les modules nécessaires au processus de téléprésence robotique, c'est à dire à la fois à la téléopération robotique et à la vision robotique décrites ci-dessous.

### 2.5.2. Contrôle des mouvements de tête du robot

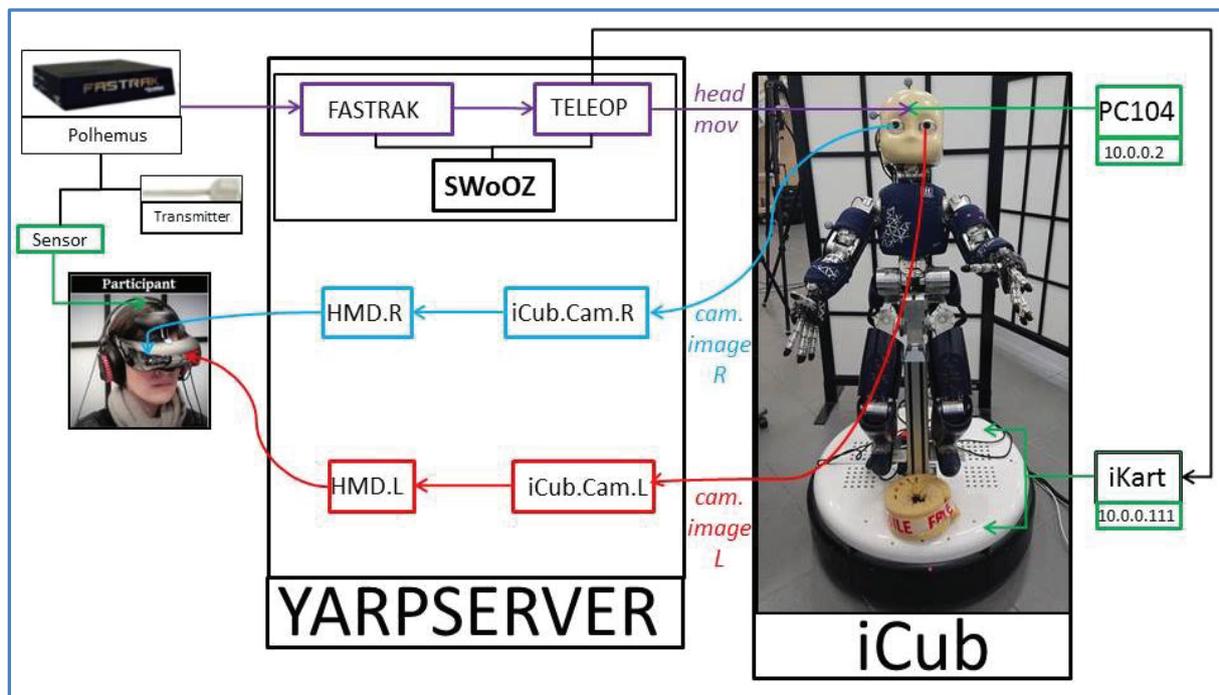
Les mouvements de tête du robot peuvent être contrôlés de deux façons différentes. La première manière de contrôler ces mouvements se fait en lançant une séquence de mouvements programmés auparavant depuis le *YARP Motor Gui* pour l'*iCub* et depuis le module *R-Sequence* de l'ordinateur *Reeti* pour *Reeti*. La seconde manière de contrôler les mouvements de tête des robots se fait par le biais de l'enregistrement des mouvements de tête du sujet en temps réel, grâce aux signaux de position envoyés par le système de suivi de mouvement *Polhemus Fastrack*, comme détaillé dans la zone A de la Figure 2-6.

Pour enregistrer et pour stocker les coordonnées des mouvements de tête du sujet, on exécute le module *yarpdatadumper* dans le module *YARPmanager*. Dans la Figure 2-6, les différents programmes, qui permettent d'obtenir la position de la tête via le système de suivi de mouvement *Polhemus Fastrack* et celui qui contrôle les mouvements de la tête du robot, sont montrés dans la fenêtre *window* du module *YARPmanager*.

### 2.5.3. Vision par le biais du casque de réalité virtuelle

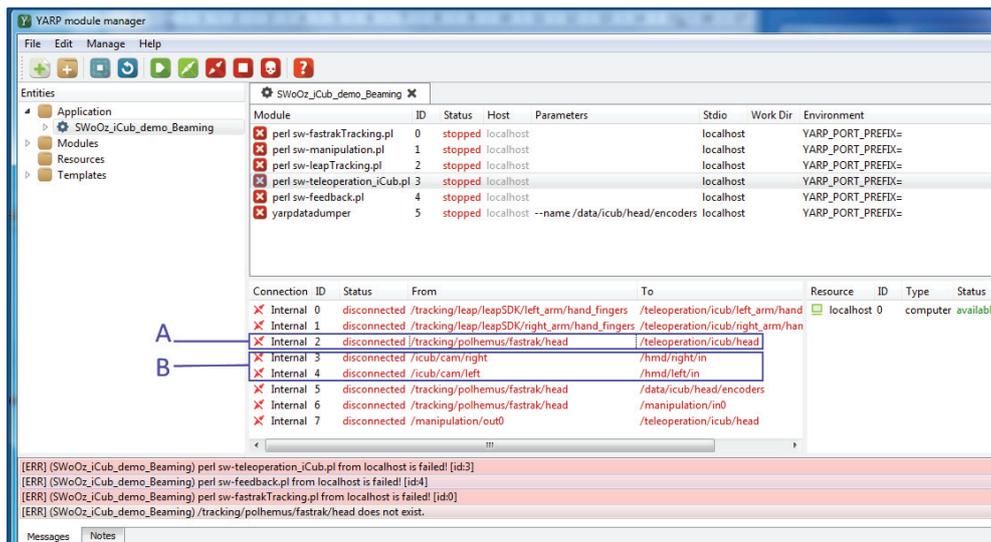
La vision par le biais du casque de réalité virtuelle se met en place en plusieurs étapes (Figure 2-5). L'application *calibrated\_cameras* permet d'accéder aux caméras incluses dans les yeux du robot. Le module *yarpdev*, disponible via le *yarp module manager*, permet de connecter la caméra de l'œil gauche et celle de l'œil droit de robot *iCub* et

d'interposer l'espace vu par l'œil droit et l'œil gauche des robots afin d'obtenir une vision en 3D.



**Figure 2-5 :** Les modules nécessaires à l'expérience de téléprésence et leurs interactions dans le cas du robot iCub.

Le démarrage de `perl sw-feedback.pl` dans l'application `SWoOz_iCub_demo_Beaming` du YARP module manager permet d'exécuter les processus qui récupèrent les signaux vidéo de sortie des deux caméras et les transmettent aux deux affichages dans le casque de réalité virtuelle HMD stéréo. Ces connexions schématisées dans la Figure 2-5 sont représentées dans la zone B de la Figure 2-6.



**Figure 2-6 :** L'application *SWOoZ\_iCub\_demo\_Beaming* permet de suivre en direct quels processus sont actifs ou non :

- A. Le processus `/tracking/polhemus/fastrak/head` est connecté au processus `/teleoperation/icub/head`. Il reçoit les données de position de tête du sujet enregistrées par le Polhemus Fastrack en temps réel, ces données permettent également de contrôler le robot iCub en temps réel.
- B. Les processus qui permettent aux deux caméras du robot `/icub/cam/right` et `/icub/cam/left` d'interagir avec les autres composants du système sont connectés respectivement aux processus `/hmd/right/in` et `/hmd/left/in` qui permettent d'afficher les champs visuels respectifs, droit et gauche du robot. Ces deux champs visuels sont, par la suite, superposés afin que le sujet ait accès à une vision 3D de l'environnement du champ visuel du robot.



## Chapitre 3 : Expériences Visuo-Motrices

Les expériences présentées dans ce chapitre seront décrites successivement suivant le même canevas à savoir la présentation des objectifs et des hypothèses sous-jacentes, la description du matériel et des méthodes incluant le protocole expérimental, l'analyse des données et enfin la présentation des résultats. Les deux premières expériences présentées, à savoir l'expérience de téléprésence robotique TéléVM (Mouvement Synchrone versus Statique) et l'expérience TéléVM (Mouvement Synchrone versus Mouvement Asynchrone) ont été effectuées antérieurement au travail présenté dans cette thèse (Ventre-Dominey *et al.*, 2019). Ma contribution à cette partie expérimentale concerne l'analyse des réponses aux questionnaires, et celle des données de mouvements de tête, incluant l'élaboration de l'algorithme d'extraction et de calcul des paramètres de mouvements dans chaque plan de l'espace. La troisième expérience présentée dans ce chapitre, et pour laquelle j'ai participé à l'élaboration des protocoles, l'acquisition des données et leur analyse, s'appuie sur ces deux premières expériences. Une partie de la contribution de ma thèse est de comparer les résultats de mes nouvelles expériences avec ces deux expériences précédentes, il est donc important de présenter les deux premières expériences en détail ci-dessous.

Dans cette série d'expériences d'interaction homme-robot, notre objectif est d'étudier les capacités d'incorporation au sein d'un robot et leurs conséquences sur la cognition sociale lors de mouvements simultanés du sujet humain et du robot, en situation de téléportation robotique (ou téléprésence) comparée à une interaction directe face à face. Afin d'étudier les effets du type de robot d'apparence humanoïde ou non, deux robots sont utilisés, le robot humanoïde (*iCub*) versus le robot non-humoïde (*Reeti*). Ce premier axe d'étude se focalisera sur les effets de manipulations motrices par mouvements de tête du sujet synchrones à ceux du robot en comparaison avec une situation où le robot reste immobile (statique) ou effectue des mouvements asynchrones à ceux du sujet.

## 1. Expérience 1 (TéléVM : Synchrones vs Statique)

### 1.1. *Objectifs et hypothèses*

Ventre-Dominey et ses collaborateurs (Ventre-Dominey *et al.*, 2019) ont proposé dans cette première expérience de tester l'hypothèse selon laquelle l'acceptabilité sociale des robots (humanoïdes et non-humanoïdes) peut être affectée par la sensation d'être incorporé ou non au sein d'un robot, dans la situation expérimentale suivante : les participants ont pour consigne de réaliser une tâche visuo-motrice à savoir des mouvements de tête en situation de téléprésence. La procédure de téléprésence s'appuie sur les techniques d'interface homme-robot décrites au chapitre 2. Dans cette première expérience, les sujets effectuent des mouvements en situation de téléprésence tandis que chaque robot effectue des mouvements synchrones au sujet ou reste statique. L'objectif est de comparer ces deux situations, synchrone ou statique, en évaluant, d'une part, l'impact sur le degré d'incorporation au sein d'un robot et, d'autre part, les conséquences sur la cognition sociale, notamment la composante d'acceptabilité du sujet vis-à-vis du robot.

### 1.2. *Matériel et Méthodes*

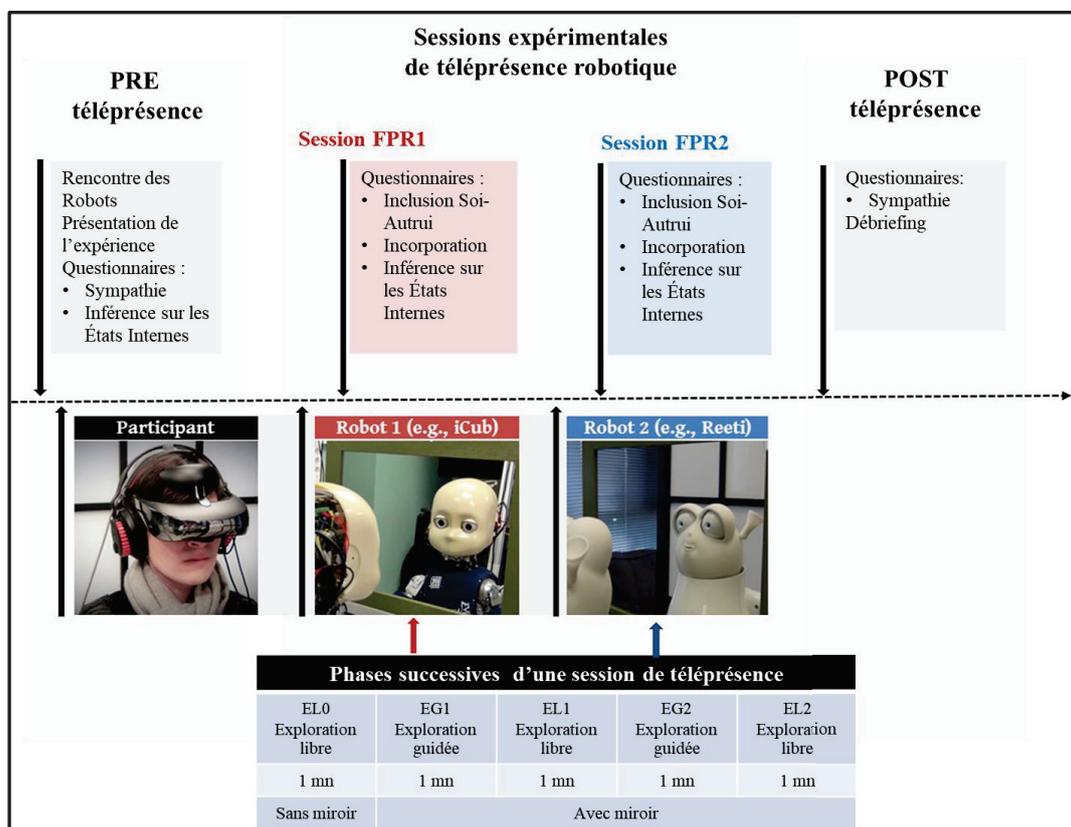
#### 1.2.1. **Participants**

Pour l'expérience de téléprésence visuo-motrice (TéléVM), ont été testés 16 sujets sains, droitiers, dont 8 hommes et 8 femmes d'âge moyen 24 ans ( $SD = 2,75$ ), sans déficits ou antécédents neurologiques, psychiatriques ou ORL. La puissance, c'est-à-dire la probabilité de détecter un effet qui est présent dans la population dont est issu l'échantillon, dépend de plusieurs facteurs : la taille d'effet dans la population, la taille de l'échantillon (plus elle est élevée, plus la puissance est importante) et le seuil de significativité. Le choix du nombre de sujets a été établi en regard de la taille de l'effet présentée lors d'études antérieures qui questionnaient l'influence des illusions multisensorielles sur la perception corporelle et sociale (Paladino *et al.*, 2010, Mazurega *et al.*, 2011), à l'aide du logiciel G\*Power -version 3.1.9.3 pour atteindre une puissance égale ou supérieure à 0,75 (Faul, 2007). Les sujets recrutés parmi les étudiants de l'École doctorale étaient naïfs concernant les hypothèses et les objectifs de l'étude. Ils avaient donné leur consentement éclairé avant l'expérience. L'étude a été réalisée sous agrément (autorisation n° 10028) de la Préfecture de Rhône-Alpes autorisant la recherche biomédicale à l'Institut Cellules Souches et Cerveau. L'expérience a été, par ailleurs, réalisée

en respectant les principes de la dernière version de la déclaration d'Helsinki (*World Medical Association, 2013*).

### 1.2.2. Le protocole expérimental

Cette étude a été réalisée avec les robots *iCub*, et *Reeti* décrits précédemment au chapitre 1. Rappelons que les deux robots ont tous deux une tête mobile avec des traits de visage incluant les yeux, le nez, la bouche et les oreilles pour *Reeti*, et les yeux et le nez pour *iCub*. Seuls les yeux et la tête des deux robots sont mobiles. Des caméras vidéo, insérées dans les yeux du robot, permettent au robot d'explorer l'environnement visuel. D'un point de vue de l'apparence globale, le robot *iCub* a une forme humanoïde, approximativement la taille d'un enfant de 3 ans, tandis que le robot *Reeti* s'apparente à un personnage de dessin animé.



**Figure 3-1 : Configuration expérimentale de téléprésence lors de manipulations visuo-motrices montrant :** 1) *A gauche*, le sujet muni d'un casque HMD de réalité virtuelle et d'un casque audio sur lequel est fixé le capteur de mouvement et 2) *au centre*, le robot humanoïde *iCub* et, *à droite*, le robot *Reeti*, faces à un miroir qui permet au sujet de se voir en tant que robot. **En haut**, la description des différentes étapes du protocole expérimental associées à chaque situation illustrée. **En bas**, les phases successives d'une session de téléprésence effectuées avec chacun des robots sont présentées dans le tableau.

L'expérience dont la configuration est schématisée dans la Figure 3-1 se déroule en quatre étapes : la présentation de l'expérience (1), les tests pré-téléprésence (2), les deux sessions de téléprésence robotique incluant des questionnaires (3) puis les tests post-téléprésence (4).

#### **a. Présentation de l'expérience et des robots**

Le sujet est informé brièvement de l'objectif de la recherche qui consiste à déterminer les conditions optimales d'interactions homme-robot en vue de leurs utilisations futures en milieu public, commercial, médical, ou socio-culturel. Après cette introduction, le sujet placé face au robot est présenté à celui-ci qui, identifié par son nom, effectue une série préprogrammée d'une dizaine de mouvements de tête dans les différents plans de l'espace. Cette interaction permet au sujet de se familiariser avec chacune des deux plateformes robotiques avant l'expérience de téléprésence. Le protocole, schématisé dans la Figure 3-1, et les consignes à suivre, lors des sessions d'interactions homme-robot et des passations des questionnaires, sont ensuite décrits au sujet de manière succincte.

#### **b. Tests pré-téléprésence**

Le sujet est invité à s'asseoir pour répondre à deux questionnaires : un premier questionnaire de sympathie (SYMP.pr) pour chaque robot et un second questionnaire d'inférence sur les états internes (IEI.self). Ces questionnaires sont présentés au paragraphe 1.2.3.

#### **c. Session de téléprésence robotique**

Le sujet est assis dans la pièce d'expérimentation de façon à être hors du champ visuel du robot et par conséquent non visible par celui-ci, pendant tout le déroulement de l'expérience. Le casque de réalité virtuelle Sony HMD (Head Mounted Display) avec affichage stéréo est installé sur la tête du sujet qui voit maintenant à travers les yeux du robot, grâce à l'affichage visuel du casque. Le sujet se trouve alors immédiatement téléporté dans l'environnement visuel du robot. Afin d'isoler le sujet du bruit extérieur, nous positionnons sur sa tête un casque audio sur lequel est fixé le capteur de mouvements. Le capteur de mouvement permet d'enregistrer les

mouvements de la tête du sujet pour piloter les mouvements de la tête du robot, en temps réel. La téléprésence et la sensation d'incorporation qui en découle sont induites par ce montage qui permet de coupler les informations visuo-spatiales entre sujet et robot. Une fois installé en situation de téléprésence robotique, le sujet est libre d'explorer l'environnement visuel du robot. Pour renforcer la sensation d'incorporation, un miroir, positionné sur une tablette mobile, est placé à une distance de 20 cm, en face et à hauteur du visage du robot. Le sujet se voit par conséquent, en tant que robot, dans le miroir comme s'il était à une distance de 40 cm de ce dernier.

<i>Condition</i>	<b>Synchrone</b>								<b>Statique</b>							
<i>Robot</i>	Reeti				iCub				Reeti				iCub			
<i>Ordre</i>	I		II		I		II		I		II		I		II	
<i>Sexe</i>	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F
<i>Nombre</i>	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

**Tableau 3-1 : Randomisation des sujets pour l'expérience TéléVM (synchrone versus statique)**

Pour chaque sujet, l'expérience consiste en deux sessions expérimentales de téléprésence robotique successivement avec chacun des deux robots. Dans une des sessions, les mouvements du robot sont synchrones de ceux du sujet, c'est la session synchrone (SYN) et dans l'autre, alors que le sujet exécute toujours les mêmes mouvements de tête, le robot reste immobile, c'est la session statique (STA). L'ordre des sessions (SYN et STA) ainsi que le type de robot (*Reeti* ou *iCub*)/session sont randomisés (Tableau 3-1). Pendant les sessions de téléprésence, il est demandé au sujet de ne pas réaliser de mouvements brusques. Afin d'éviter tout biais expérimental qui serait lié à une réduction des mouvements (en nombre et amplitude) dans la condition statique, il lui est également mentionné que le robot peut se mettre à bouger à n'importe quel moment, consigne incitant ainsi le sujet à bouger la tête.

La session expérimentale de téléprésence se déroule en 5 phases : une première phase d'exploration libre (EL0) d'une durée d'une minute pendant laquelle il est donné comme consigne au participant d'explorer l'environnement visuel en tant que robot par le biais de la réalité virtuelle. S'en suit une deuxième phase consistant en une exploration guidée d'une

minute (EG1) face au miroir durant laquelle le sujet doit effectuer une séquence de 25 mouvements verbalisés par l'expérimentateur à partir d'une liste préétablie (par exemple en haut à droite, en bas à droite, en bas à gauche, au centre, etc.) ; ces mouvements étant orientés et limités aux bords et angles du miroir (Figure 3-1). Après cette première session d'exploration guidée, s'en suit une troisième phase consistant en une exploration libre (EL1) d'une minute face au miroir durant laquelle le sujet explore librement son reflet en tant que robot ainsi que l'environnement aux alentours. Durant EL1, il est demandé au sujet de réaliser des balayages tout en se concentrant principalement sur le robot. Le sujet effectue ensuite une quatrième phase d'exploration guidée (EG2), puis, dans la continuité, une cinquième phase d'exploration libre (EL2). EL2 terminée, le sujet, libéré du casque de réalité virtuelle, est invité à s'asseoir devant une table afin de répondre aux questionnaires de test d'Interaction Soi-Autruï (ISA), de test d'Incorporation (INC) et de test d'Inférence sur les États Internes correspondant au robot avec lequel il vient d'interagir (IEI.rob). Une fois les réponses aux questionnaires terminées, le sujet est à nouveau installé pour la seconde session de téléprésence avec l'autre robot. Cette deuxième session de téléprésence (TPR2) se déroule de la même manière que la session décrite précédemment en 5 phases successives, seule diffère l'attitude du robot qui, soit restera immobile/statique (condition STA), soit effectuera des mouvements de tête synchrones (condition SYN) de ceux du sujet.

#### **d. Test post-téléprésence**

Après les deux sessions expérimentales de téléprésence robotique incluant les questionnaires ISA, Incorporation, et IEI, le sujet doit répondre au dernier questionnaire de sympathie (SYMP.pst).

L'expérimentation se termine par un « debriefing », consistant en une série de questions adressées au sujet sur l'expérience et plus particulièrement sur les éventuelles sensations d'incorporation dans le robot.

#### **1.2.3. Les questionnaires**

Les sujets sont ainsi invités à répondre à différents questionnaires afin de quantifier le degré d'acceptation sociale et d'incorporation dans le robot. Ces questionnaires, présentés au sujet à des moments différents de l'expérience, permettent de mesurer plusieurs variables

dépendantes : la Sympathie en début et en fin d'expérience soit avant et après les deux sessions de téléprésence robotique, l'Inclusion Soi-Autruï (ISA), l'Incorporation après chaque session expérimentale et l'Inférence sur les États Internes (IEI) avant la première session et après chaque session expérimentale. Le détail de ces questionnaires est décrit successivement ci-dessous.

### a. La sympathie (SYMP)

Le questionnaire de sympathie est remis au sujet après la présentation des robots en début d'expérience (SYMP.pr) puis après la deuxième session de téléprésence en fin d'expérience (SYMP.pst.). Comme montré sur la Figure 3-2, le sujet a pour consigne d'évaluer sur une échelle subjective entre 0 et 100 (0 indiquant « très antipathique » et 100 « très sympathique ») le niveau de sympathie qu'il éprouve pour chacun des deux robots. Le sujet doit cocher la ligne en un point, situé entre 0 et 100, correspondant à son niveau de sympathie pour le robot.

REETI

ICUB

Sympathie

0 100

Sympathie

0 100

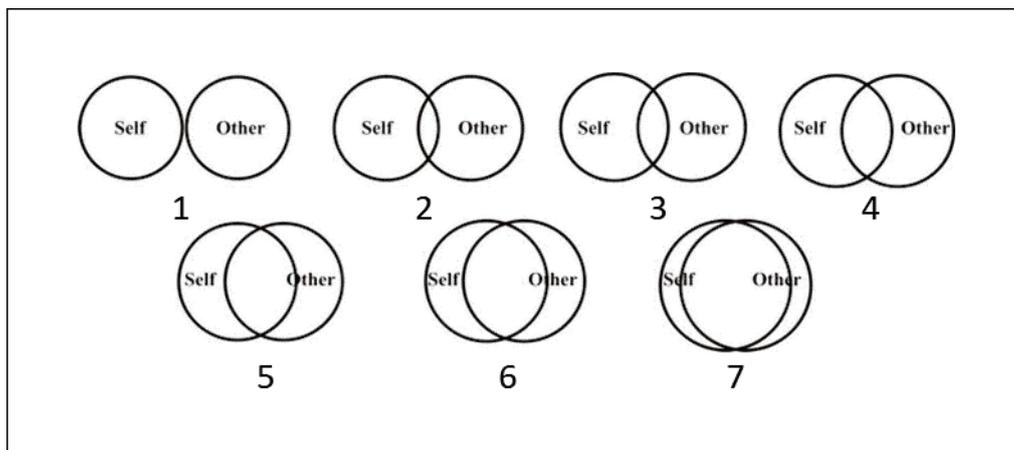
Indiquer sur l'échelle subjective le niveau de sympathie que vous inspire chaque robot.

**Figure 3-2 : Questionnaire de sympathie** : évaluation sur une échelle subjective entre 0 et 100 (0 indiquant « très antipathique » et 100 « très sympathique ») du niveau de sympathie éprouvé pour chacun des deux robots. Le sujet doit cocher la ligne en un point, situé entre 0 et 100, correspondant à son niveau de sympathie pour le robot.

### b. L'inclusion Soi-Autruï (ISA)

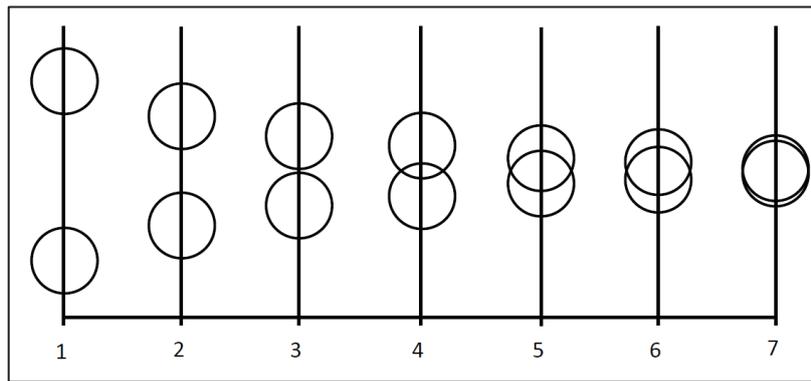
Le test ISA est une échelle graphique de mesure subjective et discrète qui permet d'évaluer le sentiment d'affinité du sujet envers le robot en termes de proximité. Ce test s'inspire du test *d'Inclusion of the Other in the Self* (IOS) de Aron et ses collaborateurs (Aron *et al.*, 1992). L'échelle d'inclusion Soi-Autruï a été utilisée pour mesurer la proximité

interpersonnelle entre Soi (*Self*) et Autrui (*Other*). Comme illustré dans la Figure 3-3, cette mesure comprend 6 figures représentant différents degrés de chevauchement entre deux cercles. Le cercle de gauche représente le Soi (*Self*) et le cercle de droite représente Autrui (*Other*). L'échelle est conçue de telle sorte que le degré de chevauchement entre les deux cercles progresse linéairement en 7 étapes. Les participants doivent indiquer, en entourant le chiffre correspondant allant de 1 (rejet) à 7 (fusion), quelle figure reflète le mieux leur relation avec autrui. Plus le score est élevé plus l'affinité avec autrui est élevée.



**Figure 3-3: Test original d'Inclusion of the Other in the Self (IOS) (Aron et al., 1992)**

Dans notre étude, la disposition des cercles a été modifiée permettant au sujet d'avoir une représentation clarifiée et ordonnée de la progression des chevauchements de cercle. Une échelle graphique à 7 points a été faite d'une série de deux cercles couplés illustrant le soi et l'autre (ici le robot) avec différents degrés de chevauchement, des cercles distants (1) aux cercles coïncidents (7) (Figure 3-4).



**Figure 3-4: Test d'Inclusion Soi-Autruï (ISA) utilisé dans l'expérience**

Le cercle du bas représente le sujet, tandis que le cercle du haut le robot. Le participant est amené à choisir une paire de cercle selon 7 degrés d'affinité : 1) *pas d'affinité* 2) *très légère affinité* 3) *légère affinité* 4) *affinité* 5) *forte affinité* 6) *très forte affinité* 7) *totale affinité*. Ce test subjectif est remis au sujet après chaque session de téléprésence.

### **c. L'incorporation (INC)**

Le questionnaire d'incorporation, présenté dans la Figure 3-5, a pour objectif de mesurer le niveau de sensation d'incorporation au sein du robot selon une évaluation sur une échelle subjective située entre 0 à 100. En cochant la ligne en un point situé entre 0 et 100, le sujet indique le niveau d'incorporation ressentie lors de l'expérience tel que la phrase la décrit. Le score d'incorporation est évalué au travers de trois catégories d'affirmations portant sur :

- La sensation que son visage ressemble à celui du robot – *enfacement*– (App.v), soit la catégorie Appropriation des traits du visage, mesurée par 6 questions
- La sensation d'être à l'emplacement du robot – *location*–, soit la catégorie Localisation (Loc) c'est-à-dire la situation spatiale du sujet/robot, mesurée par 4 questions
- La sensation de contrôler le mouvement du robot – *agency*–, soit la catégorie Agentivité (Ag) qui, plus précisément, traduit la sensation de contrôle moteur qu'exerce le sujet sur le robot mesurée par 7 questions

Le score de chaque catégorie correspond à la moyenne des scores indiqués pour chaque assertion de cette catégorie. Ce questionnaire de 18 affirmations est remis au sujet après chaque

session expérimentale. C'est une adaptation du test d'incorporation de l'illusion de la main en caoutchouc RHI « *Rubber Hand Illusion* » (Botvinik & Cohen 1998) qui comporte 9 items. Dans notre cas, la partie du corps questionnée est le visage.

1. J'avais l'impression de me regarder dans le miroir 0 100

2. J'avais l'impression que le visage du robot commençait à ressembler à mon visage 0 100

3. J'avais l'impression que le visage du robot était mon visage 0 100

4. J'avais l'impression que le visage du robot m'appartenait 0 100

5. J'avais l'impression d'être à la place du robot 0 100

6. J'avais l'impression d'être transporter à l'intérieur du robot. 0 100

7. J'avais l'impression d'être protégé à l'intérieur du robot 0 100

8. J'avais envie de bouger en tant que robot 0 100

9. J'avais l'impression que les mouvements de la tête du robot sont mes mouvements de tête. 0 100

10. J'avais l'impression que les mouvements de tête du robot reproduisent mes propres mouvements 0 100

11. J'avais l'impression de diriger la tête du robot 0 100

12. J'avais l'impression de diriger les yeux du robot 0 100

13. J'avais l'impression que je pouvais faire parler le robot 0 100

14. J'avais l'impression que si je fais des grimaces, le robot fera les mêmes grimaces 0 100

15. J'avais l'impression que ma tête était de taille réduite 0 100

16. J'avais l'impression que ma peau était devenue pale 0 100

17. J'avais l'impression que mon nez était plus petit 0 100

18. J'avais l'impression que ma peau avait une texture plastifiée. 0 100

Commentaires

**Figure 3-5 : Les différentes assertions du test d'incorporation associées aux trois catégories d'incorporation étudiées dans les expériences visuo-motrices : en rouge, l'appropriation du visage ou des traits du visage (App.v), en vert, la localisation ou situation spatiale du sujet/robot (Loc), et en violet, l'agentivité (Ag).**

#### d. L'inférence sur les États Internes (IEI)

L'inférence sur les états internes qui mesure la correspondance entre le soi et le robot, *Interferences of Inner States*, est inspirée du test initialement développé pour la tâche de

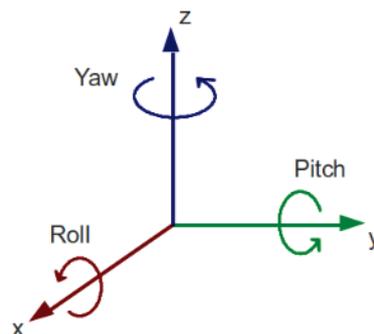
Mitchell (Mitchell *et al.*, 2006 ; Paladino *et al.*, 2010). Pour cette expérience, ce sont dix-sept questions sur la personnalité qui ont été présentées trois fois. Une première série de dix-sept questions fermées et personnelles se référant à soi-même, c'est-à-dire au sujet (*Dans l'ensemble, êtes-vous une personne de confiance ?*). Les mêmes dix-sept questions se référant à chaque robot, le sujet de chaque question étant le robot, sont posées de la même manière (*Dans l'ensemble, est-il une personne de confiance ?*), après chaque session de téléprésence robotique. Le sujet répond en cochant une des cases OUI/NON. Pour permettre le traitement des données, ces réponses sont ensuite transformées en chiffres binaires, 1 pour « OUI », 0 pour « NON » et « NA » lorsque le sujet présente une difficulté dans le choix de sa réponse.

#### 1.2.4. Traitement des données expérimentales et analyse statistique

Des analyses statistiques ont été menées après traitement des données brutes des mouvements de tête et des réponses aux questionnaires.

##### a. Traitement des données expérimentales de mouvements de tête

Les mouvements de tête du sujet, repérés selon les angles de Tait-Bryan (Figure 3-6), ont été enregistrés pendant les sessions libres et guidées de chaque expérience de téléprésence, synchrone et statique.



**Figure 3-6 : Les variables angulaires du mouvement de tête, Lacet (Yaw), Tangage (Pitch), Roulis (Roll).**

### i. Organisation des données

L'information temporelle du début jusqu'à la fin de l'enregistrement de la session est stockée dans un fichier `.txt` nommé `info`. Les données, recueillies en continu lors de chaque enregistrement pendant les cinq phases d'explorations guidées et libres, sont stockées dans un fichier `.txt` `data`. Un exemple de fichier `data` est présenté dans le Tableau 3-2. La deuxième colonne des fichiers `data` contient l'information temporelle au même format que dans les fichiers `info`. Chaque ligne du fichier correspond aux données avec un découpage temporel d'un vingtième de secondes. Les colonnes 4 à 6 contiennent l'orientation en angle de Tait-Bryan (degrés) respectivement selon les axes Lacet (*Yaw*), Tangage (*Pitch*) et Roulis (*Roll*), arrondis à  $10^{-6}$ . Les colonnes 7 à 9 contiennent, quant à elles, les valeurs de position de la tête du sujet.

A		B			
HeadDataExample - Notepad		t(s)	Yaw (deg)	Pitch (deg)	Roll (deg)
-1	1454577762.060540	0,00	-7,17	4,77	3,12
-1	1454577762.110543	0,05	-7,24	4,72	3,18
-1	1454577762.160546	0,10	-7,20	4,70	3,14
-1	1454577762.210549	0,15	-7,25	4,66	3,16
-1	1454577762.260552	0,20	-7,24	4,70	3,10
-1	1454577762.310555	0,25	-7,28	4,64	3,14
-1	1454577762.360558	0,30	-7,38	4,61	3,12
-1	1454577762.411561	0,35	-7,32	4,63	3,06
-1	1454577762.460563	0,40	-7,23	4,53	3,17
-1	1454577762.511566	0,45	-7,33	4,45	3,11
-1	1454577762.560569	0,50	-7,19	4,43	3,12
-1	1454577762.610572	0,55	-7,28	4,48	3,04
-1	1454577762.660575	0,60	-7,34	4,49	3,06
-1	1454577762.710578	0,65	-7,39	4,50	3,09
-1	1454577762.760580	0,70	-7,38	4,48	3,05
-1	1454577762.810583	0,75	-7,31	4,48	3,02
-1	1454577762.860586	0,80	-7,35	4,49	3,01
-1	1454577762.910589	0,85	-7,39	4,55	2,95
-1	1454577762.960592	0,90	-7,35	4,47	2,98
-1	1454577763.010595	0,95	-7,27	4,45	3,00
-1	1454577763.060598	1,00	-7,36	4,41	3,02

**Tableau 3-2 :** A) Données non formatées relatives aux mouvements de rotation de la tête et B) Données formatées relatives aux mouvements de tête sur une durée de deux secondes. En violet, le timing ; en bleu, l'angle de rotation suivant l'axe lacet (yaw) ; en rouge, l'angle de rotation suivant l'axe tangage (pitch) ; et en vert, l'angle de rotation suivant l'axe roulis (roll).

ii. *Extraction des moyennes des angles de rotation et de leur dispersion*

L'objectif de ce premier niveau d'analyse est le repérage et la caractérisation des mouvements de tête du sujet à partir des valeurs des angles de rotation, enregistrées au cours du temps pour chaque séquence. Les données sont exportées et réorganisées dans le tableur *Microsoft Excel* (.xls), comme illustré dans le Tableau 3-2 B. L'information temporelle est conservée sous la variable t, temps relatif au début de la séquence avec une précision de  $10^{-2}$ .

À partir des données de ce fichier, cinq séquences de mouvements d'une minute sont découpées selon les cinq phases de mouvements libres et guidés de chaque session (EL0, EG1, EL1, EG2 et EL2), comme illustré dans la Figure 3-7. Pour chaque sujet, seules les séquences de mouvements libres (SL1, SL2) et guidés (SG1, SG2) sont extraites pour analyse, et ceci, pour chaque session expérimentale de téléprésence, conduisant à huit séquences de mouvements par sujet.



**Figure 3-7 : Exemple de séquences de mouvements représentant les différents orientations :** en bleu, l'angle de rotation suivant l'axe Lacet ; en rouge, l'angle de rotation suivant l'axe Tangage ; et en vert, l'angle de rotation suivant l'axe Roulis, en fonction du temps (en seconde). SL0, SL1, et SL2 représentent les séquences libres, et SG1 et SG2, les séquences guidées.

iii. *Identification des mouvements par détection d'un pic de vitesse et mesure de l'amplitude de chaque mouvement*

Afin d'extraire et de calculer les paramètres de mouvements lors des phases d'exploration libre, une première analyse est faite sur les mouvements de tête enregistrés lors des phases d'exploration guidée.

Pour chaque séquence de mouvement, la dérivée première, c'est-à-dire la vitesse, est calculée en chaque point pour chacun des trois angles (Lacet, Tangage et Roulis). Le module de la vitesse est déduit des dérivées de chacune des composantes selon l'expression précisée dans l'extrait du programme Python présenté dans la Figure 3-8.

```
print("Recherche des pics dans le module de la vitesse ")
thr = input("Seuil pour les pics (valeurs entre 0 et 1) : ")

dist= input("Distance minimale entre les pics (valeur par défaut = 10) : ")

seuil=str(thr)+ "-" + str(dist)

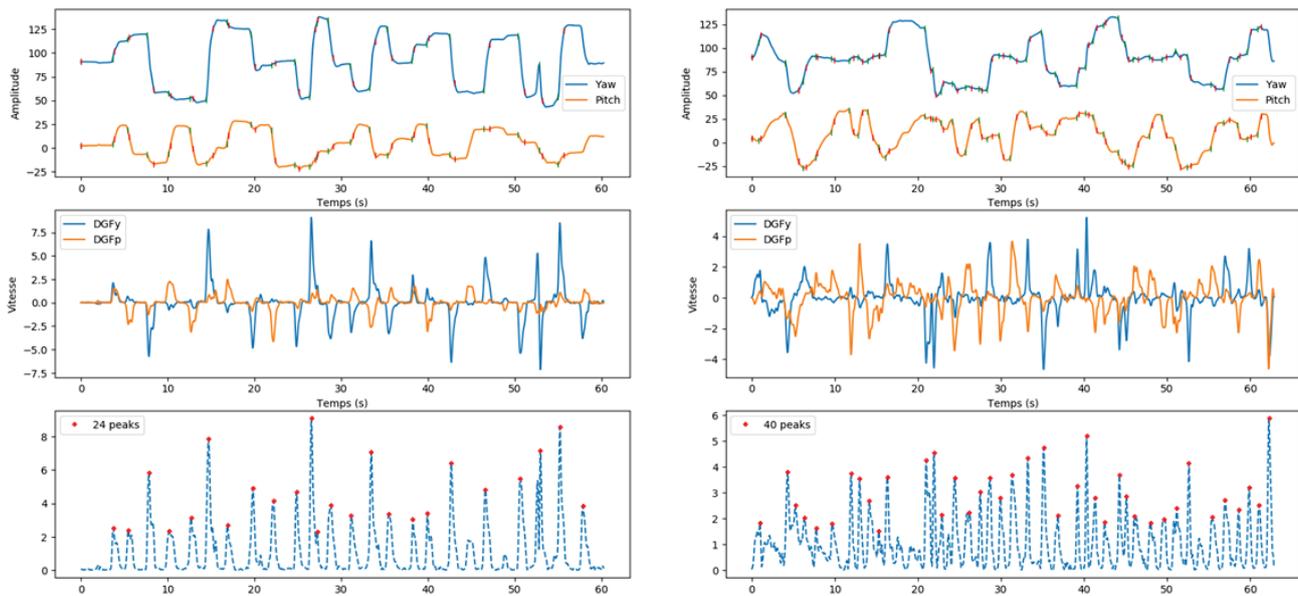
indexes = peakutils.indexes(modvit, thres=thr, min_dist=dist)|

#Calcul de la dérivée première (vitesse du mouvement selon chacun des axes)
sigma=1 #filtrage du bruit (plus la valeur est grande, plus de petites oscillations sont éliminées en plus des pics qui s'élargissent)
ordre=1 #ordre de la dérivée (1 pour la vitesse)
methode=str(sigma)+str(ordre) #chaîne de caractère pour les noms des figures
DFGy = scipy.ndimage.filters.gaussian_filter1d(y,sigma,order=ordre) # vitesse selon l'axe "lacet"
DFGp = scipy.ndimage.filters.gaussian_filter1d(p,sigma,order=ordre) # vitesse selon l'axe "tangage"
DFGr = scipy.ndimage.filters.gaussian_filter1d(r,sigma,order=ordre) # vitesse selon l'axe "roulis"

#Calcul du module de la vitesse
DFGyC = DFGy*DFGy
DFGrC = DFGr*DFGr
DFGpC = DFGp*DFGp
modvit=np.sqrt(DFGyC+DFGrC+DFGpC) #racine des carrés des trois composantes de la vitesse suivant les trois composantes du signal
```

*Figure 3-8 : Calcul du module des vitesses (extrait du programme Python) et détermination des paramètres de mouvements par le programme écrit sous Python : la fonction «peakutils.indexes» recherche dans la liste « modvit », pour des valeurs supérieures au seuil « thres » (entre 0 et 1), tous les pics séparés par une distance minimum « min\_dist ». Les résultats contenus dans un tableau donnent le nombre de pics trouvés et indique, pour chaque pic, la valeur et la position du maximum.*

Afin de déterminer un seuil permettant l'extraction des mouvements de tête, nous utilisons une fonction « peakutils.indexes » qui recherche dans la liste des modules de vitesse, les pics correspondant au dépassement d'un seuil fixé par l'expérimentateur. Les séquences guidées qui sont formatées en amplitude et nombre de mouvements sont utilisées pour déterminer ce seuil qui sera ensuite appliqué aux séquences libres pour extraire les mouvements de tête effectués. Un exemple d'analyse de séquence de mouvement est présenté dans la Figure 3-9.



**Figure 3-9 : Exemple de l'analyse du mouvement d'une séquence.** La figure supérieure représente les valeurs des angles Lacet et Tangage, en bleu et en orange, respectivement. La figure centrale représente les vitesses calculées. La figure inférieure représente le module de la vitesse utilisé pour repérer les mouvements. Les pics sélectionnés sont marqués d'un point rouge. L'information temps, correspondant au début et à la fin de chaque mouvement, est indiquée par un tiret vertical vert et rouge, respectivement.

De part et d'autre de chaque pic de vitesse, on recherche les points du signal de la dérivée où la vitesse est inférieure ou égale à 0,1. Ces instants correspondent au début et à la fin du mouvement et nous permettent donc d'en mesurer l'amplitude pour les angles Lacet et Tangage. L'amplitude des angles Roulis est trop faible pour être prise en compte. La moyenne et la dispersion des amplitudes sont calculées pour chaque séquence libre, EL1 et EL2. Les amplitudes des mouvements sont ensuite moyennées pour chaque session expérimentale de téléprésence robotique. Les variables extraites de cette analyse de mouvements de rotation de la tête sont l'amplitude des mouvements, leur variabilité, et le nombre de mouvements par séquence libre. La différence maximum d'amplitude sur l'ensemble des amplitudes des deux séquences libres sera aussi extraite de cette analyse.

#### a. Réponses aux questionnaires

Dans cette expérience, les variables mesurées sont le score de sympathie (SYMP), le score d'inclusion Soi-Autruï (ISA), le score d'incorporation (INC) mesuré à travers les trois

catégories définies précédemment à savoir, l'Appropriation des traits du visage (App.v), la Localisation (Loc) et l'Agentivité (Ag), et le score d'inférence des états internes (IEI).

Le score de sympathie (SYMP) est exprimé en pourcentage du score maximal de l'échelle subjective (0-100). Le score ISA correspond à la valeur du degré d'affinité choisi par le sujet. Pour chaque phrase d'incorporation, le score est exprimé en pourcentage du score maximal de l'échelle subjective (0-100) et le score INC de chaque catégorie d'incorporation résulte de la moyenne des scores obtenus pour l'ensemble des assertions de cette catégorie. Le score IEI a été évalué en attribuant la valeur 1 et 0 aux réponses positives et négatives, respectivement.

### **b. Analyse statistique des données**

Des études de normalité et d'homogénéité des variances de chaque variable ont été effectuées à partir du test de Kolmogorov-Smirnov et du test de Levene, respectivement. Dans l'expérience décrite ici, la distribution des données répondait aux hypothèses de normalité et d'homogénéité de la variance à  $p > 0,05$ . Des analyses de variances ANOVA et des tests paramétriques statistiques ont alors été réalisées avec le progiciel d'analyse avancée STATISTICA (v12, Statsoft Inc., Tulsa, OK, USA) pour les scores SYMP, ISA et INC. Lorsqu'un effet principal ou une interaction étaient significatifs après l'analyse de variance, des comparaisons *a posteriori* (post-hoc) utilisant le test de Bonferroni ont été effectuées, basées sur la comparaison de toutes les moyennes deux à deux.

Une procédure Test T pour échantillon unique a été utilisée afin de tester si la moyenne du score INC diffère d'une constante spécifiée et notamment de la valeur nulle.

Pour la variable IEI, la distribution de la variable binaire –c'est-à-dire à deux modalités– n'étant pas gaussienne, les scores IEI ont été corrélés entre les réponses « soi » et « autre » avec un test de Spearman (distribution non gaussienne des variables binaires).

#### *i. Les facteurs*

Les ANOVA à mesures répétées ont été effectuées sur les variables SYMP, ISA et INC et les effets de plusieurs facteurs intra-sujet et inter-sujet ont été analysés :

- Le facteur inter-sujet Type de Robot (*ROB.Type*) en condition synchrone, à deux modalités : *Reeti* / *iCub*

- Le facteur intra-sujet État du Robot (*ROB.État*) à deux modalités : Synchrones (SYN) et Statique (STA)
- Le facteur intra-sujet, Catégorie d’Incorporation (*CAT*) à trois modalités : l’appropriation des traits du visage (App.v), l’estimation de la position spatiale ou localisation (Loc) et la sensation de contrôle du mouvement ou agentivité (Ag) ; pour l’étude de l’Incorporation
- Le facteur intra-sujet, Situation pré-expérience et post-expérience de téléprésence (*PREPOST*) à deux modalités : PRE-téléprésence (PRE) et POST-téléprésence (POST) ; pour l’étude de la Sympathie

## ii. *Les variables questionnaires*

Pour la variable SYMP, nous avons effectué une ANOVA mixte à mesures répétées avec deux facteurs intra-sujet, la situation *PREPOST* (PRE versus POST) et l’état du robot *ROB.État* (SYN versus STA) ; et un facteur inter-sujet, le type de robot *ROB.Type* (*Reeti* versus *iCub*).

Pour la variable ISA, une analyse de variance mixte à mesures répétées a été menée avec un facteur intra-sujet, l’état du robot *ROB.État* (SYN versus STA) et un facteur inter sujet, le type de robot *ROB.Type* (*Reeti* versus *iCub*).

Pour la variable INC, une ANOVA mixte à mesures répétées a été utilisée avec deux facteurs intra-sujet, l’état du robot *ROB.État* (SYN versus STA) et la catégorie d’Incorporation *CAT* à savoir l’appropriation des traits du visage (App.v), la localisation (Loc) et l’agentivité (Ag) et le facteur inter-sujet, le type de robot *ROB.Type* (*Reeti* versus *iCub*). De plus, un Test T à échantillon unique a été effectué sur la variable INC afin de tester l’hypothèse que les scores INC sont significativement supérieurs à la valeur référente, qui est ici 0, dans les deux états possibles du robot, SYN et STA.

Pour la variable IEI, pour chaque participant, les corrélations entre les scores du soi, le sujet, et les scores de l’autre, le robot, ont été analysées avec un test de Spearman dans la condition statique, puis dans la condition synchrone.

### iii. *Les variables de mouvements*

Une analyse de variance sur 12 des 16 sujets a été menée sur les variables issues de l'analyse des mouvements de rotation de la tête : l'amplitude de la variation de l'angle de tangage ( $A_T$ ) et l'amplitude de la variation de l'angle de lacet ( $A_L$ ) du mouvement de tête, leurs dispersions,  $DISP_{AT}$  et  $DISP_{AL}$ , le nombre de mouvements par séquence libre,  $NM_T$  et  $NM_L$ , et la différence entre l'amplitude maximum et l'amplitude minimum extraites de l'ensemble des amplitudes des deux séquences libres,  $\Delta AG_T$ , et  $\Delta AG_L$ .

## 1.3. *Résultats*

### 1.3.1. **Les hypothèses opérationnelles**

Compte-tenu des objectifs et des variables mesurées dans cette expérience, nous formulons les hypothèses suivantes pour l'expérience TéléVM (synchrone vs statique) :

**Hypothèse 1 :** *Dans cette première hypothèse, nous proposons que les mouvements de tête synchrones robot-sujet induisent l'émergence significative d'une sensation d'incorporation notamment d'agentivité comparativement à la situation où le robot est statique.*

**Hypothèse 2 :** *Dans cette deuxième hypothèse, nous proposons que l'expérimentation de la téléprésence robotique induit un changement sur les composantes de cognition sociale du sujet que sont la sympathie et l'affinité envers le robot.*

**Hypothèse 3 :** *Dans une troisième hypothèse, nous proposons que les nombre et amplitude des mouvements de tête sont indépendants de l'état du robot, en mouvement synchrone ou sans mouvement.*

### 1.3.2. **La variable Sympathie**

Les résultats d'analyse de variance montrent que SYMP dépend de la synchronie entre les mouvements de tête du sujet et du robot (effet principal de  $ROB.État$   $F(1,14) = 16,75$ ,  $p < 0,001$ ,  $\eta^2 = 0,55$ ,  $\alpha = 0,967$ ) mais pas du type de robot  $ROB.type$  ( $F(1,14) = 0,11$ ,  $p > 0,25$ ,  $\eta^2 = 0,008$ ). Le score SYMP est significativement plus élevé dans la condition SYN par rapport à la condition STA, après expérience de téléprésence robotique ( $\langle SYMP_{SYN} \rangle = 76,57 \pm 8,26$  ;  $\langle SYMP_{STA} \rangle = 52,35 \pm 10,64$ ).

La variable SYMP dépend aussi fortement de la situation de téléprésence, i.e., la situation PRE et la situation POST testées avant et après les sessions de téléprésence, respectivement. Ainsi, en comparant la situation PRE/POST et l'état du robot SYN/STA, un effet d'interaction significatif entre les facteurs État du robot (*ROB.État*) et Situation (*PREPOST*) ( $F(1,14) = 18,50, p < 0,001, \eta^2 = 0,57, \alpha = 0,979$ ) est observé, comme le montrent les résultats de l'analyse de variance reportés dans la Figure 3-10. La comparaison *post-hoc* de Bonferroni, montre que la moyenne du score SYMP en situation POST statique diminue de manière significative par rapport à la condition synchrone ( $p < 0,001$ ) et par rapport à la situation PRE ( $p = 0,012$ ).

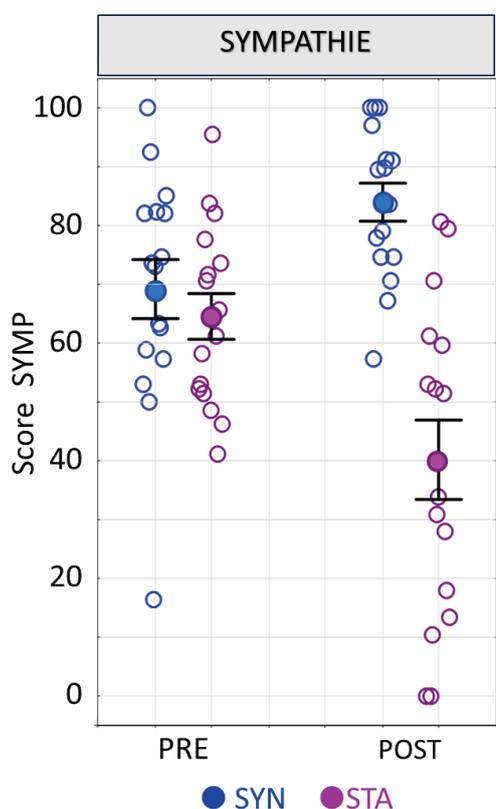


Figure 3-10 : Effets significatifs sur la variable SYMP : effet principal de la synchronie et effet d'interaction Situation (*PREPOST*) x État du Robot (*ROB.État*). Représentation graphique de la moyenne des scores de la variable Sympathie (SYMP), mesurés dans l'expérience TéléVM avant téléprésence (PRE) et après téléprésence (POST) en fonction du facteur État du robot (*ROB.État* : synchrone (SYN), statique (STA)). La moyenne, exprimée en pourcentage, est représentée par un symbole rond plein et la barre d'erreur par le trait vertical associé (erreur standard).

### 1.3.3. La variable Inclusion Soi-Autruï

Les résultats d'analyse de variance reportés sur la Figure 3-11 montrent que la variable ISA mesurée après chaque session expérimentale de téléprésence dépend fortement de l'état du robot, SYN versus STA (effet principal  $ROB.État$  :  $F(1,14) = 50,81$ ,  $p < 0,001$ ,  $\eta^2 = 0,79$ ,  $\alpha = 0,999$ ). Cependant, ils ne dépendent pas du Type de Robot ( $F(1,14) = 0,11$ ,  $p > 0,25$ ,  $\eta^2 = 0,008$ ). La moyenne des scores de la variable ISA en condition SYN est significativement supérieure à celle obtenue en condition STA ( $p < 0,001$ ). ( $\langle ISA_{SYN} \rangle = 4,81 \pm 0,75$  ;  $\langle ISA_{STA} \rangle = 2,94 \pm 0,74$ ).

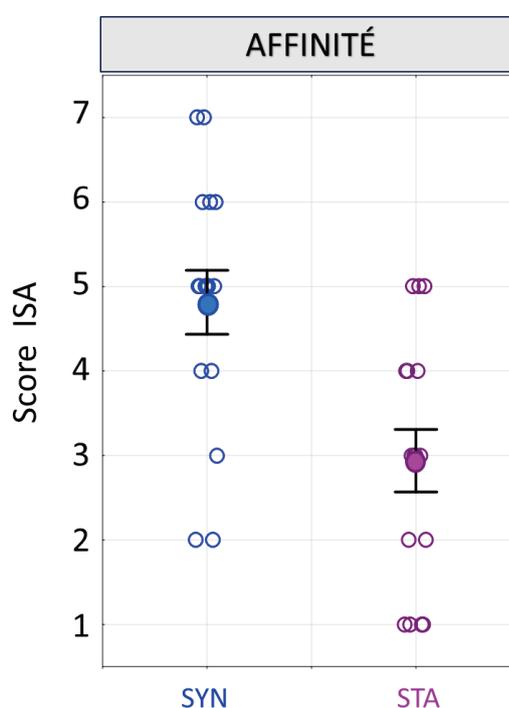


Figure 3-11 : **Effet principal de la synchronie sur la variable ISA.** Représentation graphique de la moyenne des scores de la variable Inclusion Soi-Autruï (ISA), mesurés après chaque session de téléprésence robotique, en fonction du facteur État du robot ( $ROB.État$  : synchrone (SYN), statique (STA)). La moyenne est représentée par un symbole rond plein et la barre d'erreur par le trait vertical associé (erreur standard).

### 1.3.4. La variable Incorporation

Pour chaque catégorie d'incorporation, le niveau d'incorporation est significativement supérieur à 0 en statique (Test T par rapport à la valeur référente qui est 0) : App.v ( $p = 0,0043$ ) Loc ( $p = 0,0025$ ) ; Ag ( $p \leq 0,001$ ). De même en synchrone, le niveau d'incorporation est

significativement supérieur à 0 : App.v ( $p \leq 0,001$ ), Loc ( $p \leq 0,001$ ), Ag ( $p \leq 0,001$ ). Ainsi, on remarquera qu'il existe une sensation d'incorporation non nulle dans les deux conditions SYN et STA. Les moyennes des scores d'incorporation par catégorie sont présentées dans le Tableau 3-3 en fonction de l'état de synchronie.

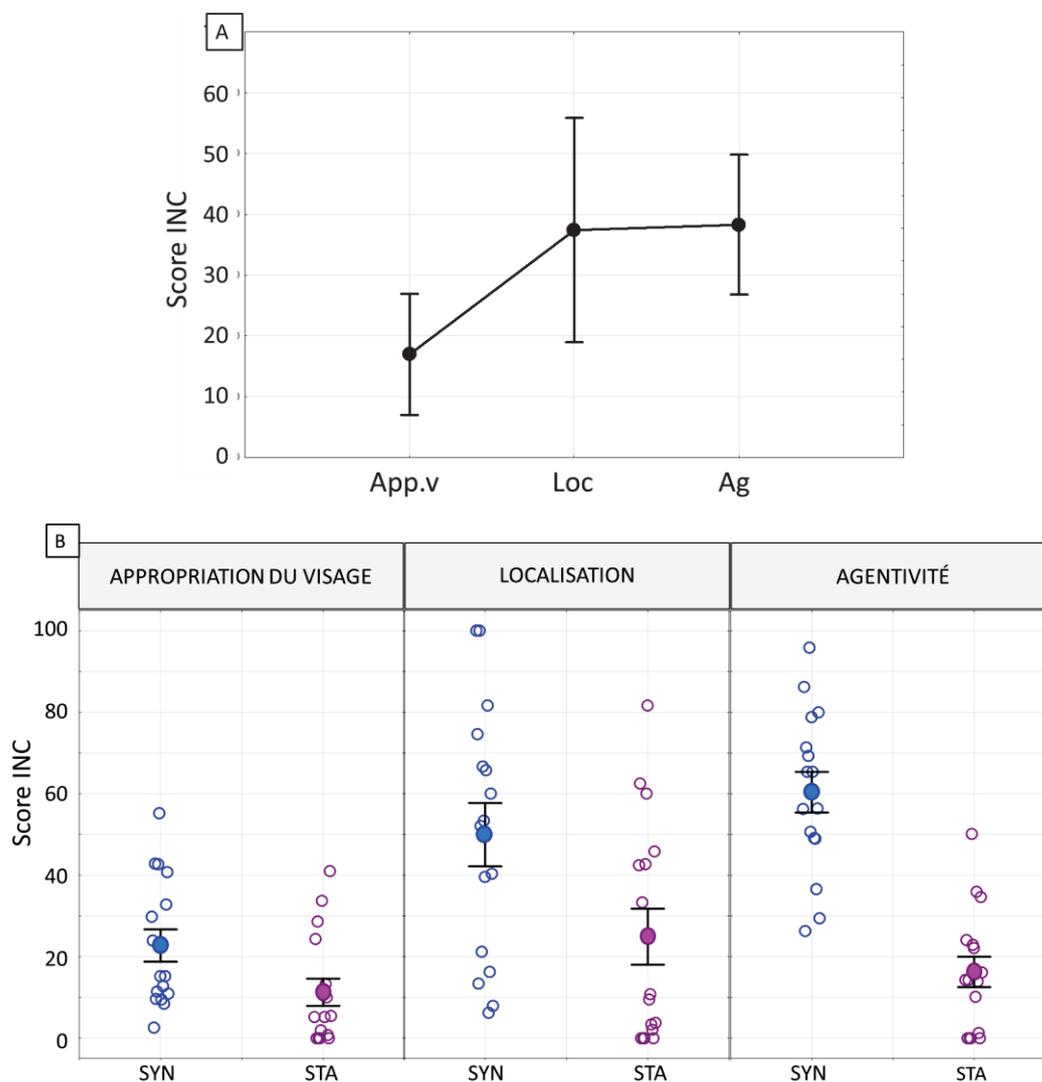
Catégories d'Incorporation	Moyenne des scores SYN(%)	Moyenne des scores STA(%)
App.v	22,71 ± 7,94	11,25 ± 6,69
Loc	49,95 ± 15,52	24,87 ± 13,76
Ag	60,40 ± 9,98	16,24 ± 7,47

**Tableau 3-3 : Moyenne des scores et déviation standard (écart-type) pour les différentes catégories d'incorporation, en condition SYN et en condition STA.**

Sur la Figure 3-12, les résultats de l'analyse de variance sur la variable INC montrent que l'incorporation du sujet dans le robot dépend de la catégorie d'incorporation (Figure 3-12 A) et de la synchronie des mouvements de tête du sujet et du robot (Figure 3-12 B). Ainsi, la moyenne du score INC dépend significativement du facteur État du Robot (effet principal  $ROB.État$  :  $F(1,14) = 59,68$ ,  $p < 0,001$ ,  $\eta^2 = 0,80$ ,  $\alpha = 0,967$ ) et de la Catégorie d'Incorporation (effet principal  $CAT$  :  $F(2,28) = 15,28$ ,  $p < 0,001$ ,  $\eta^2 = 0,52$ ,  $\alpha = 0,998$ ), mais pas du Type de Robot ( $F(1,14) = 0,87$ ,  $p > 0,25$ ;  $\eta^2 = 0,059$ ). On remarquera que l'incorporation du sujet dans le robot est favorisée en condition SYN versus STA ( $p < 0,001$ ). On a ( $\langle INC_{SYN} \rangle = 44,35 \pm 13,89$  ;  $\langle INC_{STA} \rangle = 17,45 \pm 9,86$ ).

De manière intéressante, les effets de l'état du robot sur le score INC varient significativement avec la catégorie (effet d'interaction  $ROB.État \times CAT$  : ( $F(2,28) = 12,97$ ,  $p < 0,001$ ,  $\eta^2 = 0,48$ ,  $\alpha = 0,994$ ), comme illustré sur la Figure 3-12 B. La comparaison par le test *post-hoc* de Bonferroni met en évidence que le score App.v est indépendant de l'état du robot ( $p > 0,25$ ) alors que les scores Loc et Ag augmentent de manière significative en condition SYN comparativement à la condition STA, i.e., ( $p = 0,004$ ) et ( $p < 0,001$ ), respectivement. De plus, en condition synchrone, le score App.v est significativement inférieur au score Loc ( $p < 0,001$ ) et au score Ag ( $p < 0,001$ ). En revanche, aucune différence significative n'est observée entre la moyenne des scores Loc et celle des scores Ag ( $p > 0,25$ ).

Il est intéressant de noter, qu'en condition statique, aucune différence significative n'est observée entre la moyenne des scores App.v et la moyenne des scores Loc ( $p = 0,08$ ), et celle des scores Ag ( $p > 0,25$ ).



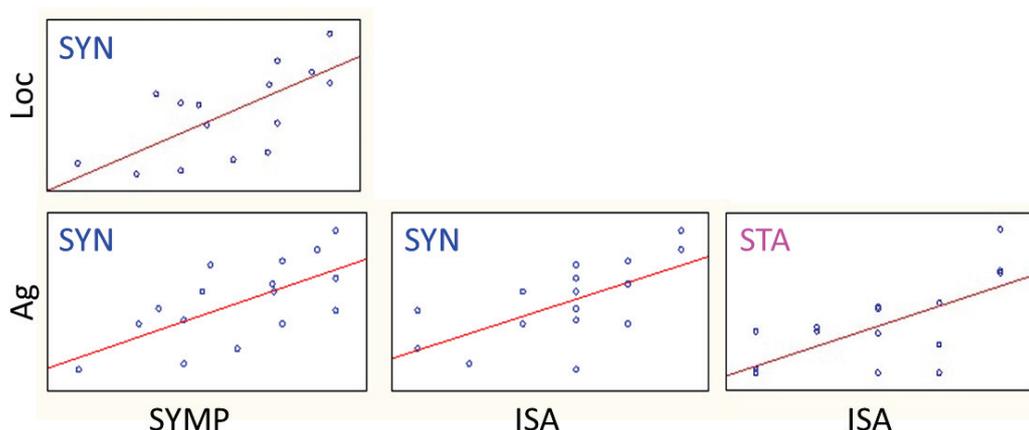
**Figure 3-12 A) Effet principal de la catégorie d'incorporation (CAT) sur la variable incorporation.** Représentation graphique de la moyenne des scores d'incorporation (INC), exprimée en pourcentage, en fonction des catégories d'incorporation, i.e., Appropriation du visage (App.v), Localisation (Loc), Agentivité (Ag). **B) Interaction État du Robot x Catégorie d'Incorporation sur la variable INC.** Représentation graphique de la moyenne des scores CAT, exprimée en pourcentage, en fonction du facteur état du robot ROB. État c'est-à-dire synchrone (SYN) ou statique (STA) pour chaque catégorie d'incorporation. La moyenne est représentée par un symbole rond plein et la barre d'erreur par le trait vertical associé (erreur standard).

### 1.3.5. La variable d'Inférence des États Internes

Pour la variable IEI, une analyse statistique à l'aide du test non paramétrique de Spearman a été conduite, sujet par sujet puis question par question. L'effet attendu est un score de corrélation entre le soi et l'autre significatif en condition synchrone et un score de corrélation entre le soi et l'autre non significatif en asynchrone. Aucun sujet ne donne les résultats attendus pour la variable IEI, pour cette expérience. Dans l'analyse question par question, la question « Êtes-vous (/est-il) en faveur de la peine de mort ? » donne le résultat attendu, ce qui représente environ 6 % des questions.

### 1.3.6. Résultats de l'analyse des corrélations entre les variables d'incorporation et de cognition sociale

Une analyse des corrélations entre les variables d'incorporation selon la catégorie et les composantes de cognition sociale a permis d'en déduire les coefficients de corrélation de Pearson,  $r$  ( $INC_{CAT}$ ,  $V_{cognition sociale}$ ) qui donnent des informations sur l'ampleur et l'orientation de chaque corrélation étudiée. Sur la Figure 3-13 sont reportées les diagrammes des corrélations significatives au seuil de significativité 0,017 (correction Bonferroni pour les comparaisons multiples) dans les conditions synchrone et statique. De manière intéressante, des corrélations positives sont observées entre les variables  $INC_{Loc}$  et SYMP ( $r = 0,709$ ,  $p = 0,002$ ),  $INC_{Ag}$  et SYMP ( $r = 0,665$ ,  $p = 0,005$ ), et  $INC_{Ag}$  et ISA ( $r = 0,644$ ,  $p = 0,007$ ). En condition statique, une seule corrélation significative est observée entre  $INC_{Ag}$  et ISA ( $r = 0,692$ ,  $p = 0,0028$ ).



**Figure 3-13 :** *Corrélations positives en condition synchrone et en condition statique entre la variable d'incorporation selon la catégorie (App.v, Loc, Ag) et les variables de cognition sociale, SYMP et ISA. Les droites de régression, tracées en rouge, correspondent aux corrélations significatives de Pearson au seuil de significativité de 0,017.*

### 1.3.7. Les variables représentatives des mouvements de la tête

L'analyse de variance des variables représentatives des mouvements de tête montrent que les moyennes des amplitudes des angles de rotation lacet et tangage,  $A_L$  et  $A_T$ , ainsi que leur dispersion,  $DISPA_L$  et  $DISPA_T$ , sont indépendantes de l'état de synchronie du robot (Tableau 3-4). Concernant le nombre de mouvement et la variation globale d'amplitude, les résultats de l'analyse de variance montrent là-aussi que, pour chaque angle de rotation Lacet et Tangage, les moyennes de la variation globale d'amplitude,  $\Delta AG_L$  et  $\Delta AG_T$ , et du nombre de mouvements,  $NM_L$  et  $NM_T$ , sur l'ensemble des deux séquences libres sont indépendantes de l'état de synchronie du robot.

<i>Lacet</i>	<i>SYN</i>	<i>STA</i>	<i>F(1,10)</i>	<i>p</i>	$\eta^2$
$A_L$ (°)	18,55 ± 7,14	22,35 ± 9,05	0,06	> 0,25	0,007
$DISPA_L$ (°)	12,06 ± 4,60	14,56 ± 5,17	0,90	> 0,25	0,091
$\Delta AG_L$ (°)	65,38 ± 26,26	69,60 ± 15,40	0,66	> 0,25	0,076
$NM_L$	20,40 ± 5,21	19,60 ± 3,99	0,90	> 0,25	0,091
<i>Tangage</i>	<i>SYN</i>	<i>STA</i>	<i>F(1,10)</i>	<i>p</i>	$\eta^2$
$A_T$ (°)	14,57 ± 7,44	13,84 ± 7,27	1,58	0,240	0,149
$DISPA_T$ (°)	10,62 ± 6,42	8,60 ± 4,33	1,55	0,244	0,147
$\Delta AG_T$ (°)	42,06 ± 15,91	36,60 ± 13,31	0,52	> 0,25	0,061
$NM_T$	10,62 ± 6,42	8,59 ± 4,33	0,01	> 0,25	0,001

**Tableau 3-4 :** Résultats de l'analyse de variance des variables représentatives des mouvements de tête en fonction de l'état de synchronie entre les mouvements de tête du sujet et du robot. Les variables amplitude des angles de rotation,  $A_L$  et  $A_T$ , et leur dispersion,  $DISPA_L$  et  $DISPA_T$ , les différences du minimum et du maximum d'amplitude,  $\Delta AG_L$  et  $\Delta AG_T$ , et les nombres de mouvements,  $NM_L$  et  $NM_T$ , sur la globalité des séquences libres, pour chacun des deux angles de rotation Lacet et Tangage.

Comme attendu, l'ensemble des résultats sur les variables de mouvements de tête montre que les amplitudes des mouvements, leur nombre, et leur dispersion sont indépendants de la temporalité de la synchronie.

### 1.3.8. Synthèse des résultats de l'expérience TéléVM (Synchrone versus Statique)

Les résultats de cette première expérience montrent qu'un effet sur la sensation d'incorporation dans le robot est observé en condition synchrone comparativement à la condition statique. Cette sensation d'incorporation du sujet dans le robot dépend fortement de la synchronie entre les mouvements de tête du sujet et du robot, avec une augmentation significative en condition synchrone versus statique. Mais, cela est nuancé par la catégorie d'incorporation. En effet, la sensation d'incorporation dans le robot est significativement plus forte par agentivité ou par localisation comparativement à celle par appropriation des traits du visage, lorsque les mouvements du sujet et du robot sont synchrones. Ces effets ne sont pas observés en situation de téléprésence dans un robot qui reste immobile malgré les mouvements du sujet. Soulignons que l'analyse des mouvements de rotation de la tête montre que les mouvements du sujet sont indépendants de l'état de synchronie entre les mouvements du robot et le sujet. De plus, ces résultats suggèrent que l'expérimentation de téléprésence robotique, dans la situation où les mouvements du sujet et du robot sont synchrones, induit une augmentation des composantes de cognition sociale, notamment la sympathie et l'affinité du sujet vis-à-vis du robot qui apparaissent significativement plus élevés. De manière intéressante, la sympathie et l'affinité sont corrélées positivement à la sensation de contrôle du mouvement du robot lorsque les mouvements sujet-robot sont synchrones et, dans ces mêmes conditions, la sympathie est corrélée positivement à la sensation de délocalisation dans le robot. Dans cette première expérience, nous avons montré les effets de mouvements de tête simultanés entre un sujet et un robot sur les performances d'incorporation. De plus, au-delà des analyses menées par Ventre-Dominey et ses collaborateurs (2019), l'analyse des données des mouvements de tête ont permis de montrer que le nombre et les amplitudes des mouvements de tête du sujet ne dépendent pas de la synchronie des mouvements de tête entre le sujet et le robot, traduisant ainsi l'absence de biais expérimental concernant les mouvements de tête. Afin d'étudier la contribution de l'information temporelle du mouvement de tête sur

la sensation d'incorporation, nous nous sommes intéressés à une deuxième situation de mouvements comparant l'effet de la temporalité de la synchronie (mouvements synchrones versus asynchrones) sur la sensation d'incorporation et sur l'acceptation sociale.

## 2. Expérience 2 (TéléVM : Synchrones vs Asynchrones)

### 2.1. Objectifs et hypothèses

Cette deuxième expérience a pour objectif principal d'évaluer l'influence de la temporalité lors de la synchronisation des mouvements de tête sujet-robot sur les mêmes observables précédemment étudiées. Ainsi, le dispositif expérimental a été modifiée pour permettre soit des mouvements de tête synchrones sujet-robot, comme précédemment, soit des mouvements asynchrones. La sensation d'incorporation du sujet au sein du robot et les phénomènes de sympathie et affinité, reflets de la cognition sociale du sujet, seront questionnés en regard de cette condition expérimentale, synchrone vs. asynchrone.

### 2.2. Matériel et Méthodes

#### 2.2.1. Participants

Pour cette deuxième expérience, un nouveau groupe de 16 sujets, sains, droitiers, dont 8 hommes et 8 femmes de 23,8 ans d'âge moyen ( $SD = 4,00$ ), a participé à l'expérience. Tous les sujets étaient sans déficits ou antécédents neurologiques, psychiatriques, ou ORL. Notre choix du nombre de sujets a été établi en regard de la taille d'effet présentée lors d'une étude antérieure sur l'effet des illusions multisensorielles sur la perception corporelle et sociale (Paladino *et al.*, 2010, Mazurega *et al.*, 2011), à l'aide du logiciel G\*Power -version 3.1.9.339- pour atteindre une puissance égale ou supérieure à 0,75 (Faul, 2007). Les sujets recrutés parmi les étudiants de l'école doctorale étaient naïfs concernant les hypothèses et les objectifs de l'étude et avaient donné leur consentement éclairé avant l'expérience. L'étude a été réalisée sous agrément (autorisation n° 10028) de la Préfecture de la région Rhône-Alpes, autorisant la recherche biomédicale à l'Institut Cellules Souches et Cerveau. L'expérience a été, par ailleurs, réalisée en respectant les principes de la dernière version de la déclaration d'Helsinki (*World Medical Association*, 2013).

#### 2.2.2. Le protocole expérimental

Dans l'expérience TéléVM (SYN vs ASYN), les robots et le paradigme sont les mêmes que dans l'expérience TéléVM (SYN vs STA) (cf. Figure 3-1), à l'exception du facteur État du

Robot (*ROB.État*) dont la modalité statique (STA) a été remplacée par la modalité asynchrone (ASYN), mode où les mouvements du robot ne suivent pas les mouvements du sujet.

Lors de l'interaction avec le robot, il est demandé au sujet d'explorer l'environnement, tout en se focalisant sur le robot lors des sessions d'exploration libres. Le sujet doit par ailleurs s'orienter dans la direction indiquée verbalement par l'expérimentateur, lors des sessions d'exploration guidées. Pour chaque sujet, l'expérience consiste en deux sessions expérimentales de téléprésence robotique successivement avec chacun des deux robots. Dans la session synchrone (SYN), les mouvements du robot sont synchrones de ceux du sujet. Dans la session asynchrone (ASYN), alors que le sujet exécute toujours les mêmes mouvements de tête de manière exploratoire, lente et autonome, la tête du robot suit une trajectoire de mouvements pseudo-aléatoires préenregistrée. Bien qu'indépendants, les mouvements de tête du robot sont générés pour correspondre approximativement aux mêmes caractéristiques spatio-temporelles que celles des mouvements du sujet. Quatre séquences de mouvements différentes sont testées de manière aléatoire selon les sujets. L'ordre des sessions (SYN et ASYN) ainsi que le type de robot (*Reeti* ou *iCub*) sont randomisés comme présentés dans le Tableau 3-5.

<i>Condition</i>	<i>Synchrone</i>								<i>Asynchrone</i>							
<i>Robot</i>	Reeti				iCub				Reeti				iCub			
<i>Ordre</i>	I		II		I		II		I		II		I		II	
<i>Sexe</i>	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F
<i>Nombre</i>	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

**Tableau 3-5 : Randomisation des sujets pour l'expérience TéléVM (synchrone vs asynchrone)**

L'expérimentation se termine par une série de questions, adressée à chaque participant, sur l'expérience et, plus particulièrement, sur les sensations d'incorporation dans le robot, comme précisé dans le protocole de l'expérience TéléVM (SYN vs STA).

Au cours de l'expérience, les sujets sont invités à répondre aux différents questionnaires afin de quantifier le degré d'acceptation sociale et d'incorporation dans le robot : le test de sympathie SYMP, le test ISA d'identification ou Inclusion Soi-Autruï, le test IEI d'inférence

des États internes vis-à-vis de chaque robot, et le questionnaire INC, lié à la sensation d'incorporation au sein du robot. Ces questionnaires sont présentés au sujet à différents moments de l'expérience afin de mesurer les mêmes variables dépendantes de l'expérience : SYMP en début et en fin d'expérience, soit avant et après les deux sessions de téléprésence robotique, IEI avant la première session et après chaque session de téléprésence, ISA et INC après chaque session de téléprésence. Le détail de ces questionnaires est décrit dans le protocole de l'expérience Télé-VM (SYN versus STA).

### 2.2.3. Analyse de données

Une analyse de données similaire à l'expérience TéléVM (SYN vs STA) a été réalisée. Rappelons que les variables mesurées à partir des réponses aux questionnaires sont le score de sympathie, le score d'inférence des états internes, le score d'inclusion Soi-Autruï, le score d'incorporation. L'unique facteur modifié pour cette expérience est le facteur État du Robot (*ROB.État*) défini dans la suite selon les deux modalités, synchrone (SYN) vs asynchrone (ASYN).

Les variables issues de l'analyse des coordonnées angulaires des mouvements de tête sont l'amplitude des angles Lacet et Tangage, leur dispersion, le nombre de mouvements et la différence maximum d'amplitude sur l'ensemble des amplitudes des deux séquences libres.

Des études de normalité et d'homogénéité des variances de chaque variable ont été effectuées à partir du test de Kolmogorov-Smirnov et du test de Levene, respectivement. Dans l'expérience décrite ici, la distribution des données répondait aux hypothèses de normalité et d'homogénéité de la variance à  $p > 0,05$ . Des analyses de variances ANOVA et des tests paramétriques statistiques ont alors été réalisées avec le progiciel STATISTICA (v12, Statsoft Inc., Tulsa, OK, USA) pour les scores SYMP, ISA et INC. Lorsqu'un effet principal ou une interaction étaient significatifs après l'analyse de variance, des comparaisons *a posteriori* (*post-hoc*) utilisant le test de Bonferroni ont été effectuées. Une procédure Test T pour échantillon unique a été utilisée afin de tester si la moyenne du score INC diffère d'une constante spécifiée et notamment de la valeur nulle. Pour la variable IEI, les scores IEI ont été corrélés entre les réponses « soi » et « autre » avec un test de Spearman. Une analyse de variance sur 12 des 16 sujets a été menée sur les variables angulaires des mouvements de tête.

## 2.3. Résultats

### 2.3.1. Hypothèses opérationnelles

Compte tenu des objectifs présentés, nous formulons les hypothèses suivantes pour l'expérience TéléVM (synchrone vs asynchrone) :

**Hypothèse 1 :** *Dans une première hypothèse, nous proposons que la sensation d'incorporation est diminuée significativement lorsque les mouvements de tête entre le sujet et le robot sont temporellement asynchrones comparativement à la condition synchrone.*

**Hypothèses 2 :** *Dans une seconde hypothèse, nous proposons que les composantes de cognition sociale, la sympathie et l'affinité, sont dépendantes de la temporalité de l'induction, synchrone vs asynchrone, et de la situation expérimentale, pré-expérience vs post expérience.*

**Hypothèse 3 :** *Dans une troisième hypothèse, nous proposons que les nombre et amplitude des mouvements de tête sont indépendants de l'état de synchronie du robot, synchrone vs asynchrone.*

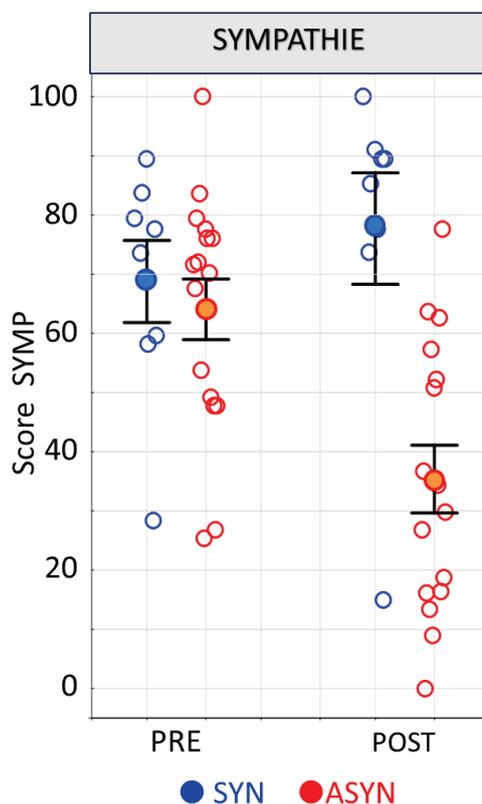
### 2.3.2. La variable Sympathie

Comme dans la configuration précédente de l'expérience TéléVM (SYN vs STA), on observe un effet principal de la synchronie des mouvements de tête sur la variable SYMP, celle-ci étant plus élevée lorsque les mouvements du sujet et du robot sont synchrones. Les résultats d'analyse de variance illustrés sur la Figure 3-14 montrent que la moyenne du score SYMP dépend significativement de l'état du robot (effet principal *ROB.État*  $F(1,14) = 18,38$ ,  $p < 0,001$ ,  $\eta^2 = 0,57$ ,  $\alpha = 0,978$ ) indépendamment du type de robot (effet principal *ROB.type*  $F(1,14) = 0,01$ ,  $p > 0,25$ ,  $\eta^2 = 0,0008$ ,  $\alpha = 0,05$ ). On a  $\langle \text{SYMP}_{\text{SYN}} \rangle = 75,01 \pm 9,72$  et  $\langle \text{SYMP}_{\text{ASYN}} \rangle = 52,35 \pm 10,64$ .

Par ailleurs, un effet du facteur de situation PREPOST est objectivé par une augmentation significative du score SYMP après expérimentation de téléprésence (effet principal Situation *PREPOST*  $F(1,14) = 15,03$ ,  $p = 0,0017$ ,  $\eta^2 = 0,52$ ,  $\alpha = 0,949$ ). Notons ici que le score de sympathie est indépendant du facteur Type de Robot (interaction *PREPOST* x *ROB.Type* ( $F(1,14) = 0,51$ ,  $p > 0,25$  ;  $\eta^2 = 0,035$  ;  $\alpha = 0,10$ ) (Figure 3-14).

De manière plus intéressante, on note un effet d'interaction significatif entre les facteurs État du Robot (*ROB.État*) et Situation (*PREPOST*) ( $F(1,14) = 8,91$ ,  $p < 0,01$ ,  $\eta^2 = 0,389$ ,

$\alpha = 0,792$ ), comme illustré sur la Figure 3-14. Le test *post-hoc* de Bonferroni montre que le score SYMP diminue de manière significative en condition POST asynchrone comparé à la condition POST synchrone ( $p = 0,0015$ ) et à la situation PRE ( $p = 0,044$ ). On a  $\langle \text{SYMP}^{\text{SYN}}_{\text{POST}} \rangle = 80,00 \pm 9,96$  ;  $\langle \text{SYMP}^{\text{ASYN}}_{\text{POST}} \rangle = 35,68 \pm 10,61$  et  $\langle \text{SYMP}^{\text{ASYN}}_{\text{PRE}} \rangle = 64,07 \pm 10,24$ .



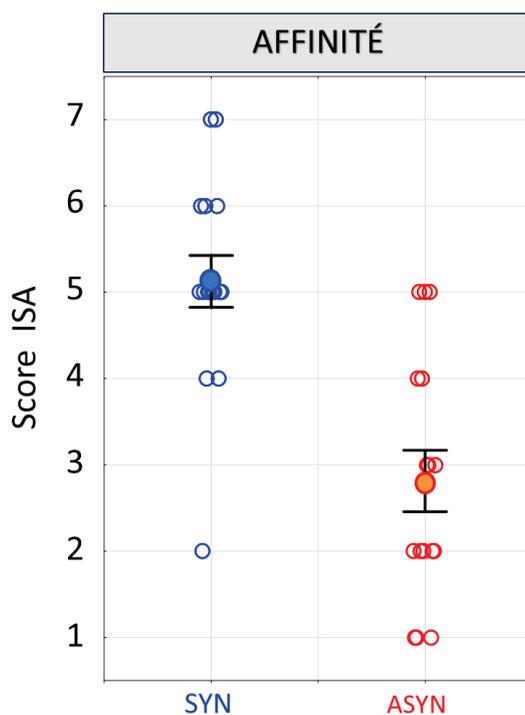
**Figure 3-14 : Effet principal de la situation expérimentale (PRE vs POST) dans l'expérience TéléVM (Synchrone versus Asynchrone) sur la variable SYMP et effet d'interaction.** Représentation graphique de la moyenne des scores de SYMP mesurés dans l'expérience TéléVM (SYN vs ASYN) avant (PRE) et après (POST) téléprésence et en fonction du facteur État du Robot (ROB.État : SYN, ASYN). La moyenne, exprimée en pourcentage, est représentée par un symbole rond plein, et la barre d'erreur par le trait vertical associé (erreur standard).

### 2.3.3. La variable Inclusion Soi-Autruï

Les résultats d'analyse de variance illustrés sur la Figure 3-15 montrent que la variable ISA est indépendante du type de robot ( $F(1,14) = 0,01, p > 0,25, \eta^2 = 0,0008, \alpha = 0,051$ ) mais varie significativement selon l'état du robot, synchrone versus asynchrone (effet principal du facteur ROB.État :  $F(1,14) = 42,78, p < 0,001, \eta^2 = 0,79, \alpha = 0,999$ ). La moyenne des scores de la

variable ISA en condition SYN est significativement supérieure à celle obtenue en condition ASYN (Bonferroni *post-hoc* :  $p < 0,001$ ). On a  $\langle ISA_{SYN} \rangle = 5,12 \pm 0,60$  et  $\langle ISA_{ASYN} \rangle = 2,81 \pm 0,71$ .

Ainsi, le degré d'affinité du sujet vis-à-vis du robot est considérablement plus élevé lorsque les mouvements du sujet et du robot sont synchrones.



**Figure 3-15:** Effet principal de l'état du robot sur la variable *Inclusion Soi-Autru* dans l'expérience *TéléVM*. Représentation graphique de la moyenne des scores de ISA en fonction du facteur État du Robot à deux modalités, conditions synchrones (SYN) ou asynchrones (ASYN). La moyenne est représentée par un rond plein et la barre d'erreur par le trait vertical associé (erreur standard).

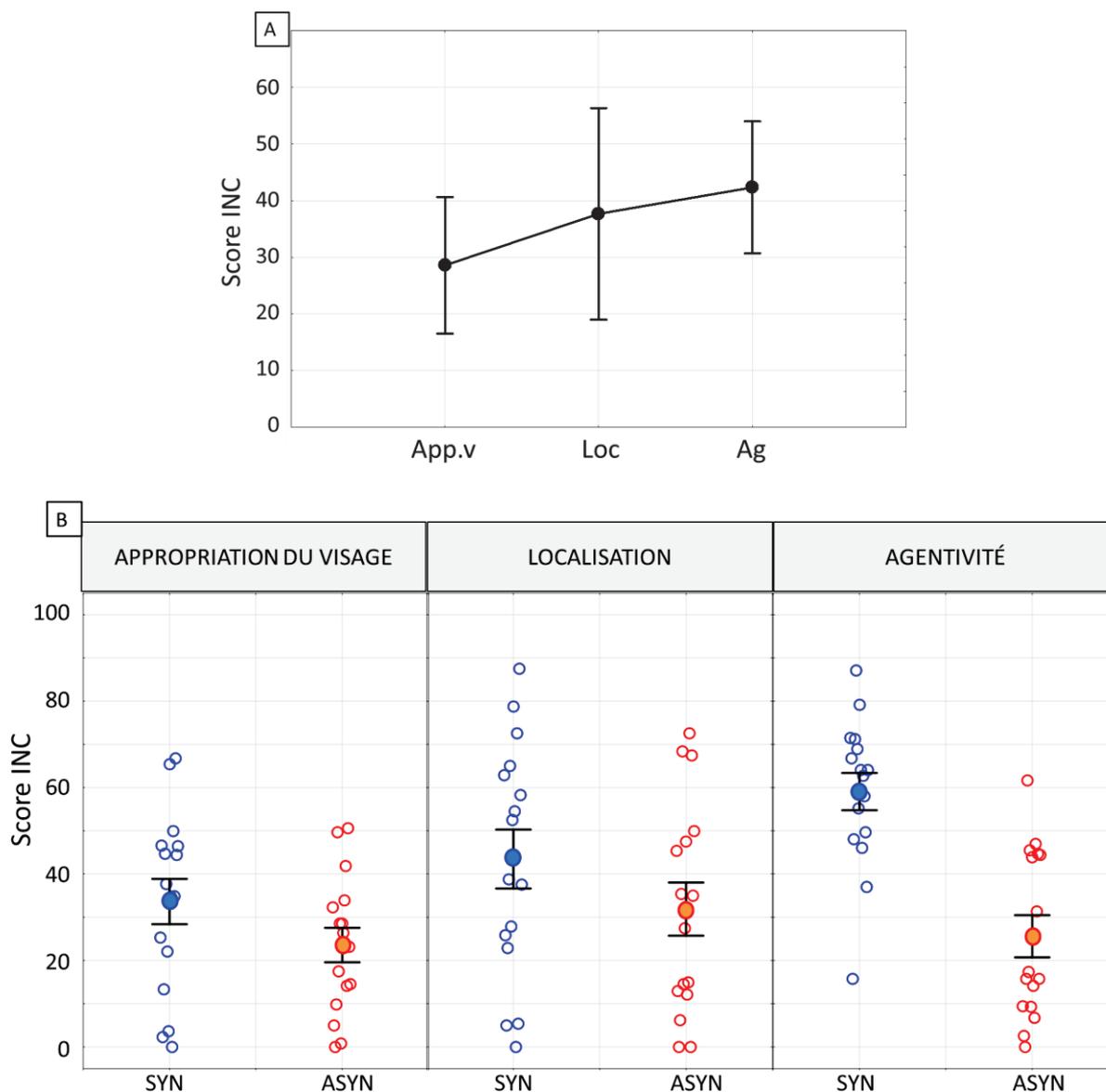
#### 2.3.4. La variable Incorporation

Pour chaque catégorie d'incorporation, le niveau d'incorporation est significativement supérieur à 0 en asynchrone (Test T par rapport à la valeur référente qui est 0) : App.v ( $p \leq 0,001$ ), Loc ( $p \leq 0,001$ ), Ag ( $p \leq 0,001$ ). De même en synchrone, le niveau d'incorporation est significativement supérieur à 0 : App.v ( $p \leq 0,001$ ), Loc ( $p \leq 0,001$ ), Ag ( $p \leq 0,001$ ). Ainsi, il existe une sensation d'incorporation non nulle dans les deux conditions, SYN et ASYN. Les moyennes des scores d'incorporation par catégorie sont présentées dans le Tableau 3-6 en fonction de l'état de synchronie.

Catégories d'Incorporation	Moyenne des scores SYN (%)	Moyenne des scores ASYN (%)
App.v	33,62 ± 10,47	23,55 ± 7,92
Loc	43,46 ± 13,63	31,87 ± 12,29
Ag	59,07 ± 8,85	25,59 ± 9,75

**Tableau 3-6 : Moyenne des scores et déviation standard pour les différentes catégories d'incorporation en condition SYN et ASYN.**

Sur la Figure 3-16, les résultats de l'analyse de variance sur la variable INC montrent que l'incorporation du sujet dans le robot dépend de la catégorie d'incorporation (Figure 3-16 A) et de la synchronie des mouvements de tête du sujet et du robot (Figure 3-16 B). Bien qu'il existe une sensation d'incorporation dans les deux états du robot, la moyenne du score INC dépend significativement du facteur État du Robot (effet principal  $ROB.État$  :  $F(1,14) = 38,46$ ,  $p < 0,001$ ,  $\eta^2 = 0,73$ ,  $\alpha = 0,999$ ), de la catégorie d'Incorporation (effet principal  $CAT$  :  $F(2,28) = 5,08$ ,  $p = 0,013$ ,  $\eta^2 = 0,27$ ,  $\alpha = 0,776$ ) et de leurs interactions ( $ROB.État \times CAT$   $F(2,28) = 9,20$ ,  $p < 0,001$ ,  $\eta^2 = 0,40$ ,  $\alpha = 0,994$ ) comme illustré sur la Figure 3-16. On a ( $\langle INC_{SYN} \rangle = 45,12 \pm 14,53$  ;  $\langle INC_{ASYN} \rangle = 27,32 \pm 13,61$ ). La comparaison par le test *post-hoc* Bonferroni met en évidence que les scores App.v et Loc sont indépendants de l'état du robot ( $p > 0,25$  et  $p = 0,18$ , respectivement) alors que le score Ag augmente de manière significative en condition SYN comparativement à la condition ASYN ( $p < 0,001$ ). De plus, en condition synchrone, le score Ag est significativement supérieur au score App.v ( $p < 0,001$ ) et au score Loc ( $p = 0,017$ ). Par contre, aucune différence significative n'est observée entre la moyenne des scores App.v et celle des scores Loc ( $p > 0,25$ ).



**Figure 3-16 :** *A) Effet principal de la catégorie d'incorporation (CAT) sur la variable incorporation.* Représentation graphique de la moyenne des scores d'incorporation (INC), exprimée en pourcentage, en fonction des catégories d'incorporation, i.e., Appropriation du visage (App.v), Localisation (Loc), Agentivité (Ag). **B) Interaction État du Robot x Catégorie d'Incorporation sur la variable INC.** Représentation graphique de la moyenne des scores INC, exprimée en pourcentage, en fonction du facteur État du Robot ROB.État, c'est-à-dire, synchrone (SYN) ou asynchrone (ASYN), pour chaque catégorie d'incorporation. La moyenne est représentée par un symbole rond plein et la barre d'erreur par le trait vertical associé (erreur standard).

### 2.3.5. La variable d'Inférence des États Internes

Pour la variable IEI, une analyse statistique à l'aide du test non paramétrique de Spearman a été menée, sujet par sujet et question par question. 18 % des sujets présentent les résultats

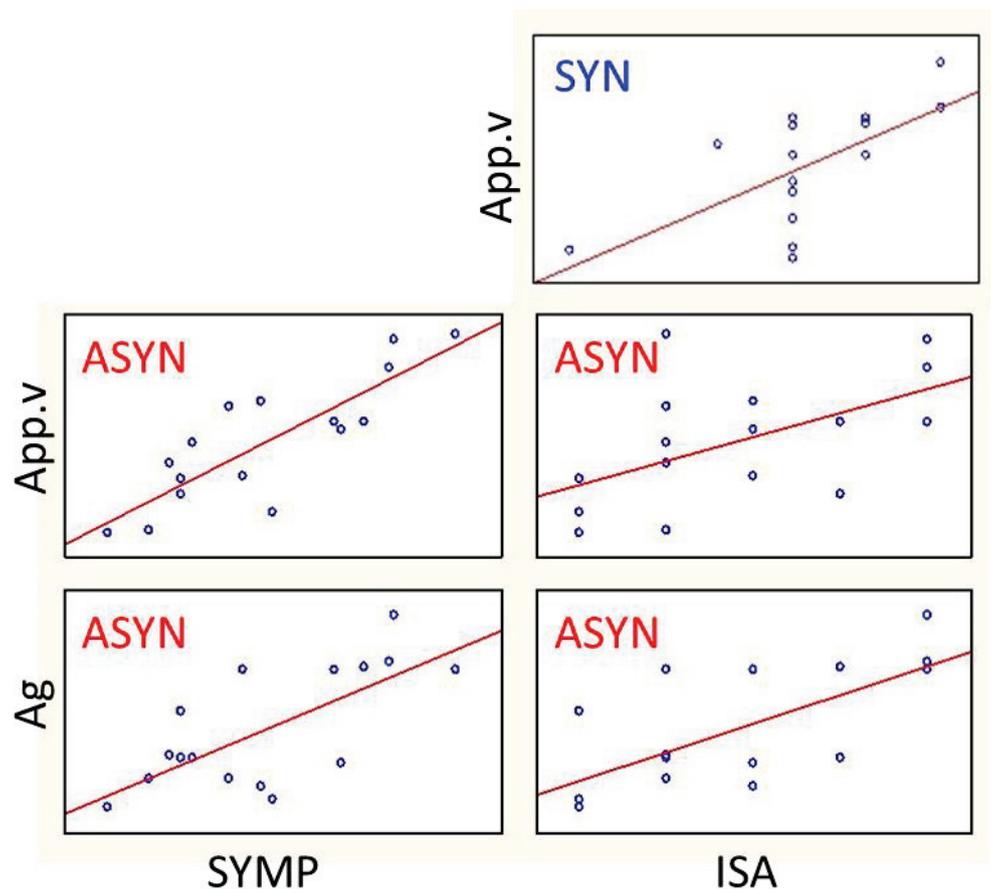
attendus, c'est-à-dire, une corrélation significative des scores sujet-robot en synchrone et non significative en asynchrone. Ce sont les sujets 3, 13 et 14:

- Pour le troisième sujet, nous observons une corrélation significative entre soi et autre en synchrone ( $R_{\text{spearman}} = 0,859, p < 0,005$ ), et pas de corrélation entre soi et autre en asynchrone ( $R_{\text{spearman}} = 0,358, p = 0,158$ ).
- Pour le treizième sujet, nous observons une corrélation significative entre soi et autre en synchrone ( $R_{\text{spearman}} = 0,553, p = 0,02$ ), et pas de corrélation entre soi et autre en asynchrone ( $R_{\text{spearman}} = 0,247, p = 0,339$ ).
- Pour le quatorzième sujet, nous observons une corrélation significative entre soi et autre en synchrone ( $R_{\text{spearman}} = 0,647, p < 0,005$ ), et pas de corrélation entre soi et autre en asynchrone ( $R_{\text{spearman}} = -0,132, p = 0,613$ ).
- Pour le huitième sujet, nous observons une corrélation significative entre soi et autre en synchrone ( $R_{\text{spearman}} = 0,763, p < 0,005$ ), mais aussi une corrélation significative entre soi et autre en asynchrone ( $R_{\text{spearman}} = 0,528, p = 0,029$ ).

Dans une analyse question par question, la question « *Avez-vous fait du bénévolat pour une organisation sociale, communautaire ?* » donne le résultat attendu, i.e. environ 6 % des questions.

### 2.3.6. Résultats de l'analyse des corrélations entre les variables d'incorporation et de cognition sociale

Une analyse des corrélations entre les variables d'incorporation selon la catégorie et les composantes de cognition sociale a permis d'en déduire les coefficients de corrélation de Pearson,  $r$  ( $\text{INC-CAT}, V_{\text{cognition sociale}}$ ) qui donnent des informations sur l'ampleur et l'orientation de chaque corrélation étudiée. Sur la Figure 3-17 sont reportés les diagrammes de corrélation dans les conditions synchrone et asynchrone. Une seule corrélation significative au seuil de 0,017 (correction Bonferroni pour les comparaisons multiples) est observée entre les variables  $\text{INC}_{\text{App.v}}$  et ISA ( $r = 0,656, p = 0,008$ ). En condition asynchrone, plusieurs corrélations significatives au seuil de 0,017 sont observées entre les variables  $\text{INC}_{\text{App.v}}$  et SYMP ( $r = 0,789, p = 0,0004$ ),  $\text{INC}_{\text{App.v}}$  et ISA ( $r = 0,70, p = 0,0036$ ),  $\text{INC}_{\text{Ag}}$  et SYMP ( $r = 0,685, p = 0,0048$ ) et entre  $\text{INC}_{\text{Ag}}$  et ISA ( $r = 0,742, p = 0,0015$ ).



**Figure 3-17 : Corrélations positives en conditions synchrone et asynchrone entre la variable d'incorporation selon la catégorie (App.v, Loc, Ag) et les variables de cognition sociale, SYMP et ISA. Ces corrélations sont tracées à partir des données de l'expérience TéléVM (SYN/ASYN). Les droites de régression, tracées en rouge, correspondent aux corrélations significatives de Pearson au seuil de significativité de 0,017.**

### 2.3.7. Les variables représentatives des mouvements de la tête

L'analyse de variance des variables représentatives de mouvements de tête dont les résultats sont reportés dans le Tableau 3-7 montre que les moyennes des amplitudes des angles de rotation Lacet et Tangage,  $A_L$  et  $A_T$ , ainsi que leur dispersion,  $DISPA_L$  et  $DISPA_T$ , sont indépendantes de l'état de synchronie du robot. Concernant le nombre de mouvement et la variation globale d'amplitude, les résultats de l'analyse de variance montrent là-aussi que, pour chaque angle de rotation Lacet et Tangage, les moyennes de la variation globale d'amplitude,  $\Delta AGL$  et  $\Delta AGT$ , et du nombre de mouvements,  $NM_L$  et  $NM_T$ , sur l'ensemble des deux séquences libres sont indépendantes de l'état de synchronie du robot.

<i>Lacet</i>	<i>SYN</i>	<i>ASYN</i>	<i>F(1,10)</i>	<i>p</i>	$\eta^2$
$A_L$ (°)	29,80 ± 5,40	26,58 ± 6,59	1,39	> 0,25	0,122
$DISPA_L$ (°)	21,52 ± 3,66	17,72 ± 3,74	3,65	0,085	0,267
$\Delta AG_L$ (°)	97,08 ± 17,62	84,48 ± 9,52	3,03	0,112	0,016
$NM_L$	19,60 ± 3,83	20,34 ± 3,01	0,23	> 0,25	0,022
<i>Tangage</i>	<i>SYN</i>	<i>ASYN</i>	<i>F(1,10)</i>	<i>p</i>	$\eta^2$
$A_T$ (°)	20,66 ± 4,29	19,22 ± 4,30	1,23	> 0,25	0,109
$DISPA_T$ (°)	13,68 ± 3,36	12,38 ± 3,68	0,91	> 0,25	0,084
$\Delta AG_T$ (°)	59,74 ± 10,94	61,76 ± 13,89	0,03	> 0,25	0,003
$NM_T$	17,84 ± 3,28	17,66 ± 3,08	0,01	> 0,25	0,001

**Tableau 3-7 : Résultats de l'analyse de variance des variables représentatives des mouvements de tête en fonction de l'état de synchronie entre les mouvements de tête du sujet et du robot.** Les variables amplitude des angles de rotation  $A_L$  et  $A_T$  et leur dispersion  $DISPA_L$  et  $DISPA_T$ ; Les différences du minimum et du maximum d'amplitude  $\Delta AG_L$  et  $\Delta AG_T$  et les nombres de mouvements  $NM_L$  et  $NM_T$  sur la globalité des séquences libres pour chacun des deux angles de rotation *Lacet* et *Tangage*.

Comme attendu, l'ensemble des résultats sur les variables de mouvements de tête montre que les amplitudes des mouvements, leur nombre, et leur dispersion sont indépendants de la temporalité de la synchronie.

### 2.3.8. Synthèse des résultats de l'expérience TéléVM (Synchrone versus Asynchrone)

Ces résultats suggèrent que la synchronisation des mouvements de tête sujet-robot constitue un point clé pour renforcer la sensation d'incorporation, et ceci essentiellement à travers le contrôle du mouvement, c'est-à-dire par agentivité. Il est remarquable aussi d'observer qu'il existe une sensation d'incorporation dans les deux situations, synchrone et

asynchrone, et rappelons que la même observation avait été faite en condition statique. Ici, c'est seulement la sensation de contrôle du mouvement qui est renforcée en condition synchrone alors qu'elle ne l'est pas en asynchrone. Du point de vue de la cognition sociale, la synchronisation induit de manière significative une plus grande sympathie et une meilleure affinité du sujet vis-à-vis du robot. Soulignons que l'analyse des mouvements de rotation de la tête montre que les mouvements du sujet sont indépendants de l'état de synchronie entre les mouvements du robot et le sujet. Ces résultats nous amènent à questionner l'importance du miroir quant aux effets d'incorporation et de cognition sociale observés. Une expérience similaire mais dans une autre situation d'interaction homme-robot, dans laquelle le sujet est directement assis face au robot, pourrait permettre de déterminer de quelle manière le miroir est un vecteur d'information cognitive implicite du soi.

### 3. Expérience 3 (FaceVM : Synchrones vs Asynchrones)

#### 3.1. *Objectifs et hypothèses*

Nous avons exploré l'effet de téléportation robotique en plaçant le sujet face à un miroir. Outre le fait que le miroir permet au sujet de suivre les mouvements synchrones ou non du robot, cette situation expérimentale renvoie au sujet un reflet de lui-même et donc pourrait faciliter un processus d'incorporation. Afin d'étudier les effets du mimétisme moteur proprement dit dans ces interactions homme-robot, nous explorerons les capacités d'incorporation et les modifications psychologiques qui l'accompagne en situation de face-à-face entre sujet et robot. En éliminant le miroir et son influence sur l'incorporation, nous pourrions étudier si les effets de délocalisation au sein du robot et d'agentivité sont modifiés. Dans le cas contraire, cela pourra indiquer que la commande motrice de la tête suffit à produire un effet d'agentivité et de délocalisation de soi au sein d'un être robotique. Ainsi, dans cette troisième expérience, nous évaluerons l'influence de l'interaction homme-robot directe, sans intermédiaire de miroir, sur la sensation d'incorporation du sujet au sein du robot dans des situations expérimentales de mouvements synchrones vs. asynchrones. L'objectif de cette troisième expérience sera de comprendre l'effet de la nature de l'interaction homme-robot sur les scores d'incorporation et de cognition sociale, et, ainsi de déterminer de quelle manière le miroir joue un rôle de renforcement du soi. Ainsi, sur la base des expériences précédentes, nous étudierons les mêmes variables SYMP, ISA, INC et IEI mais dans une condition où l'interaction homme-robot est une interaction face-à-face. Plus précisément, nous questionnerons si, dans cette situation où le sujet et le robot sont face à face, la sensation d'incorporation est toujours présente, et ceci en fonction de la catégorie d'incorporation. Nous étudierons si, là aussi, la sympathie et l'affinité du sujet pour le robot sont affectées par la synchronie des mouvements sujet-robot.

#### 3.2. *Matériel et Méthodes*

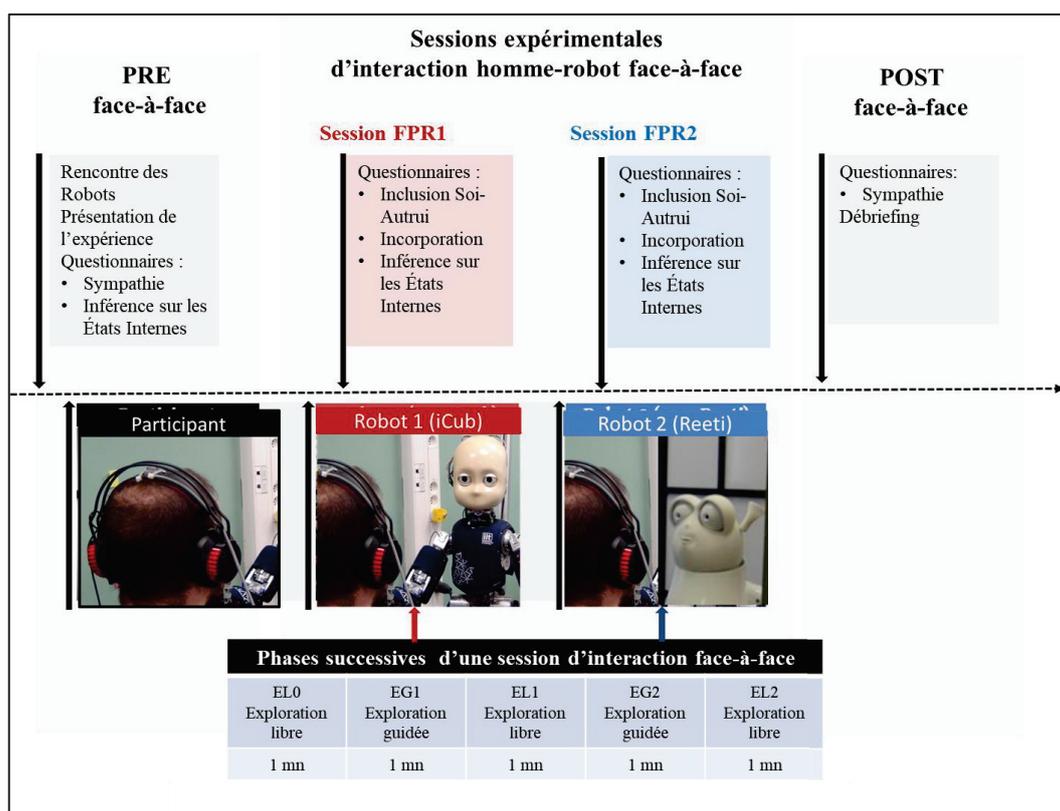
##### 3.2.1. **Participants**

Pour l'expérience FaceVM (SYN vs ASYN), un nouveau groupe de 16 sujets, sains, droitiers, et de 26 ans d'âge moyen ( $SD = 4,64$ ) a participé à l'expérience. Tous les sujets étaient sans déficits ou antécédents neurologiques, psychiatriques ou ORL. Les sujets recrutés parmi les membres de l'Institut Cellules Souches et Cerveau étaient naïfs concernant les hypothèses

et les objectifs de l'étude et avaient donné leur consentement éclairé avant l'expérience. L'étude a été réalisée sous agrément (autorisation n° 10028) de la Préfecture de la région Rhône-Alpes autorisant la recherche biomédicale à l'Institut Cellules Souches et Cerveau. L'expérience a été, par ailleurs, réalisée en respectant les principes de la dernière version de la déclaration d'Helsinki (*World Medical Association, 2013*).

### 3.2.2. Le protocole expérimental

Dans l'expérience FaceVM (SYN vs ASYN) dont la configuration est schématisée dans la Figure 3-18, les robots et le paradigme sont les mêmes que dans l'expérience TéléVM (SYN vs ASYN) à l'exception de l'interaction où participant et robot se font face. Comme précédemment, l'expérience se déroule en quatre étapes : la présentation de l'expérience (1), les questionnaires pré-tests (2), les deux sessions d'interaction face-à-face incluant les questionnaires spécifiques après chaque session (3) les questionnaires post-tests (4).



**Figure 3-18 : Configuration expérimentale d'interaction face-à-face sujet robot montrant : 1) à gauche, le sujet portant un casque audio sur lequel est fixé un capteur de mouvement de tête et 2) au centre, le robot humanoïde iCub et, à droite, le robot Reeti, qui font faces au participant. En haut, la description des différentes étapes du protocole expérimental associées à chaque situation illustrée. En bas, les phases successives d'une session de d'interaction face-à-face effectuées avec chacun des robots présentées dans le tableau.**

Ainsi, après la présentation de l'expérience puis la passation des deux questionnaires pré-tests, le sujet est installé face à un robot pendant les deux sessions successives d'interaction avec les deux robots (Face à Face Robot 1 (FFR1) et Face à Face Robot 2 (FFR2)). L'axe corporel du sujet est aligné sur l'axe médian du robot. Le sujet a pour consigne de réaliser des mouvements d'exploration du robot situé face à lui. Il est précisé au sujet que le robot est susceptible d'exécuter les mêmes mouvements de tête que lui. Le sujet est donc incité à explorer en continu le robot et son environnement immédiat quel que soit la condition. Cette consigne a pour but de maintenir une exploration motrice similaire entre conditions synchrone et asynchrone.

Comme illustré sur la Figure 3-18, chaque session commence par une phase d'exploration libre (EL0), d'une durée d'une minute, pendant laquelle il est donné comme consigne au participant d'explorer librement l'environnement. Un casque audio, sur lequel est fixé le capteur de mouvement permettant l'application de la procédure de contrôle des mouvements de tête du robot, est posé sur la tête du sujet afin de l'isoler de l'environnement sonore. Des cibles de couleur sont placées dans le plan frontal du robot à une excentricité de 20 ° horizontal et 20 ° vertical par rapport au centre de la tête du robot. Cet ensemble de cibles forment un rectangle encadrant le robot et matérialisé par 8 cibles, 4 situées aux angles et 4 au milieu des côtés. Comme dans les expériences précédentes, l'interaction face à face sujet-robot se déroule en 5 phases : Après la session test d'exploration libre (EL0), se déroule une phase d'exploration guidée d'une minute (EG1) durant laquelle le sujet doit effectuer une séquence de 25 mouvements d'orientation, verbalisée par l'expérimentateur à partir d'une liste préétablie. Les mouvements correspondent à des orientations de la tête en direction des cibles situées autour du robot. S'en suit une phase d'exploration libre (EL1) d'une minute durant laquelle le sujet explore librement le robot et l'environnement aux alentours. Durant EL1, il est demandé au sujet de réaliser déplacements de tête tout en se concentrant principalement sur le robot. Le sujet effectue ensuite une phase d'exploration guidée (EG2), puis, dans la continuité, une dernière phase d'exploration libre (EL2). EL2 terminée, le sujet est invité à s'asseoir à une table afin de répondre aux questionnaires de test ISA, INC et IEI en tant que robot (IEI.rob). Il est ensuite à nouveau installé, comme au début de la première session d'interaction face-à-face FFR1. Seul le robot est différent. Cette deuxième session d'interaction face à face (FFR2) se déroule de la même manière que la session FFR1 décrite précédemment.

Bien qu'indépendants, les mouvements de tête du robot sont générés pour correspondre approximativement aux mêmes caractéristiques spatio-temporelles que celles des mouvements

du sujet. Quatre séquences préenregistrées selon une trajectoire de mouvements pseudo-aléatoires différentes ont été contrebalancées entre les sujets. L'ordre des sessions (SYN et ASYN) ainsi que le type de robot (*Reeti* ou *iCub*) sont randomisés comme présentés dans le Tableau 3-8.

<i>Condition</i>	<b>Synchrone</b>								<b>Asynchrone</b>							
<i>Robot</i>	Reeti				iCub				Reeti				iCub			
<i>Ordre</i>	I		II		I		II		I		II		I		II	
<i>Sexe</i>	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F
<i>Nombre</i>	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

**Tableau 3-8 : Randomisation des sujets pour l'expérience FaceVM (Synchrone vs Asynchrone)**

Après les deux sessions expérimentales FFR1 et FFR2 d'interaction face-à-face homme-robot, l'expérience se termine par le questionnaire de sympathie (SYMP.pst). S'en suit alors le débriefing de l'expérience.

Au cours de l'expérience, les sujets sont invités à répondre aux différents questionnaires afin de quantifier le degré d'acceptation sociale et d'incorporation dans le robot : le questionnaire de sympathie, le test d'Inclusion Soi-Autruï, le test d'inférence des états internes vis-à-vis de chaque robot, et le questionnaire lié à la sensation d'incorporation au sein du robot. Ces questionnaires sont présentés au sujet à différents moments de l'expérience afin de mesurer les mêmes variables dépendantes de l'expérience : SYMP en début et en fin d'expérience soit avant et après les deux sessions d'interaction face-à-face, IEI avant la première session et après chaque session d'interaction face-à-face, ISA et INC après chaque session d'interaction face-à-face. Le détail de ces questionnaires est décrit dans le protocole de l'expérience Télé-VM (synchrone versus statique) au début de ce chapitre.

### 3.2.3. Analyse de données

Une analyse de données similaire aux expériences TéléVM a été réalisée. Rappelons que les variables mesurées sont le score de sympathie, le score d'inférence des états internes, le

score d'inclusion Soi-Autruï, et le score d'incorporation, alors que les facteurs identifiés sont le Type de Robot, l'État du Robot, la Catégorie d'Incorporation et la Situation expérimentale pré/post.

Des études de normalité et d'homogénéité des variances de chaque variable ont été effectuées à partir du test de Kolmogorov-Smirnov et du test de Levene, respectivement. Dans l'expérience décrite ici, la distribution des données répondait aux hypothèses de normalité et d'homogénéité de la variance à  $p > 0,05$ . Des analyses de variances ANOVA et des tests paramétriques statistiques ont alors été réalisées avec le progiciel STATISTICA (v12, Statsoft Inc., Tulsa, OK, USA) pour les scores SYMP, ISA et INC. Lorsqu'un effet principal ou une interaction étaient significatifs après l'analyse de variance, des comparaisons *a posteriori* (*post-hoc*) utilisant le test de Bonferroni ont été effectuées. Une procédure Test T pour échantillon unique a été utilisée afin de tester si la moyenne du score INC diffère d'une constante spécifiée et notamment de la valeur nulle. Pour la variable IEI, les scores IEI ont été corrélés entre les réponses « soi » et « autre » avec un test de Spearman.

Une analyse de variance sur 8 des 16 sujets a été menée sur les variables angulaires du mouvement de tête, c'est-à-dire, l'amplitude de la variation de l'angle de tangage et l'amplitude de la variation de l'angle de lacet.

Pour la variable IEI, la distribution de la variable binaire à deux modalités n'étant pas gaussienne, les scores IEI ont été corrélés entre les réponses « soi » et « autre » avec un test de Spearman (distribution non gaussienne des variables binaires).

### 3.3. Résultats

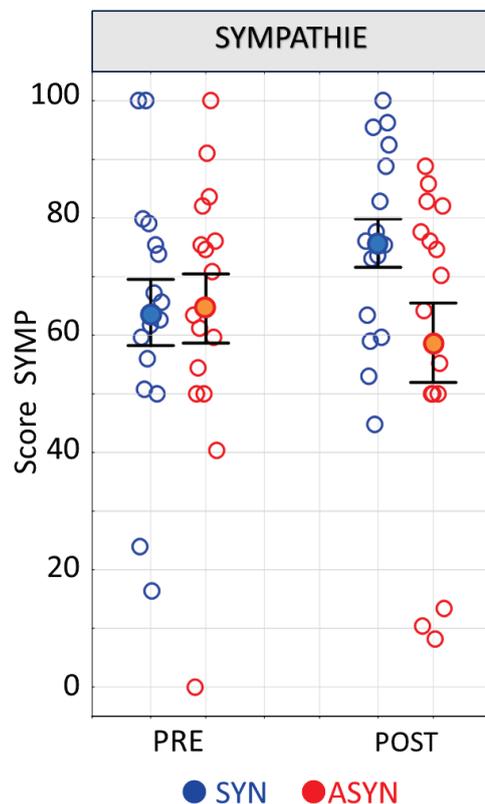
#### 3.3.1. Hypothèses opérationnelles

Compte tenu des expériences précédentes et des objectifs présentés, nous formulons notamment les hypothèses suivantes pour l'expérience FaceVM :

**Hypothèse 1 :** *Dans cette hypothèse, nous proposons, qu'après l'interaction en face-à-face du sujet avec le robot, les effets significatifs observés précédemment sur l'incorporation en téléprésence robotique sont diminués.*

### 3.3.2. La variable Sympathie

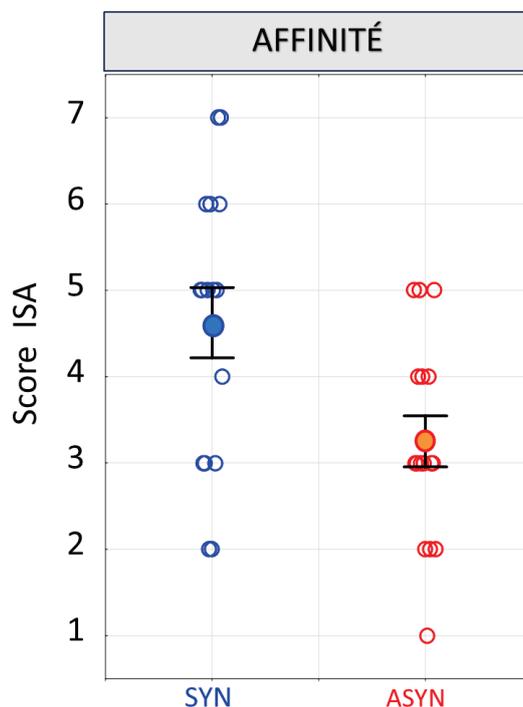
Différemment des expériences TéléVM (SYN vs STA) et TéléVM (SYN vs ASYN), nous n'avons pas observé d'effet significatif de l'état du robot sur la variable SYMP ni de la situation PREPOST (Figure 3-19). Cependant, une tendance est observée selon le facteur *ROB.État* :  $F(1,16) = 3,41, p = 0,08, \eta^2 = 0,176, \alpha = 0,421$ .



**Figure 3-19 :** Représentation graphique de la moyenne des scores *SYMP* mesurés dans l'expérience *FaceVM* (SYN vs ASYN) avant (PRE) et après (POST) interaction face-à-face et en fonction du facteur état du robot (*ROB.État* : SYN, ASYN). La moyenne, exprimée en pourcentage, est représentée par un symbole rond plein, et la barre d'erreur par le trait vertical associé (erreur standard).

### 3.3.3. La variable Inclusion Soi-Autruï

Les résultats d'analyse de variance illustrés sur la Figure 3-20 montrent que la variable ISA, indépendante du Type de Robot ( $F(1,14) = 0,068, p > 0,25, \eta^2 = 0,0048$ ), varie significativement selon l'état du robot, synchrone versus asynchrone (effet principal du facteur *ROB.État* :  $F(1,14) = 15,12, p = 0,012, \eta^2 = 0,370, \alpha = 0,760$ ). On a  $\langle ISA_{SYN} \rangle = 4,62 \pm 0,81$  et  $\langle ISA_{ASYN} \rangle = 3,25 \pm 0,59$ .



**Figure 3-20 : Effet principal de la synchronie sur la variable ISA.** Représentation graphique de la moyenne des scores de la variable Inclusion Soi-Autruï, mesurés après chaque session d'interaction face à face, en fonction du facteur État du robot, synchrone (SYN) vs asynchrone (ASYN). La moyenne est représentée par un symbole rond plein et la barre d'erreur par le trait vertical associé (erreur standard).

#### 3.3.4. La variable Incorporation

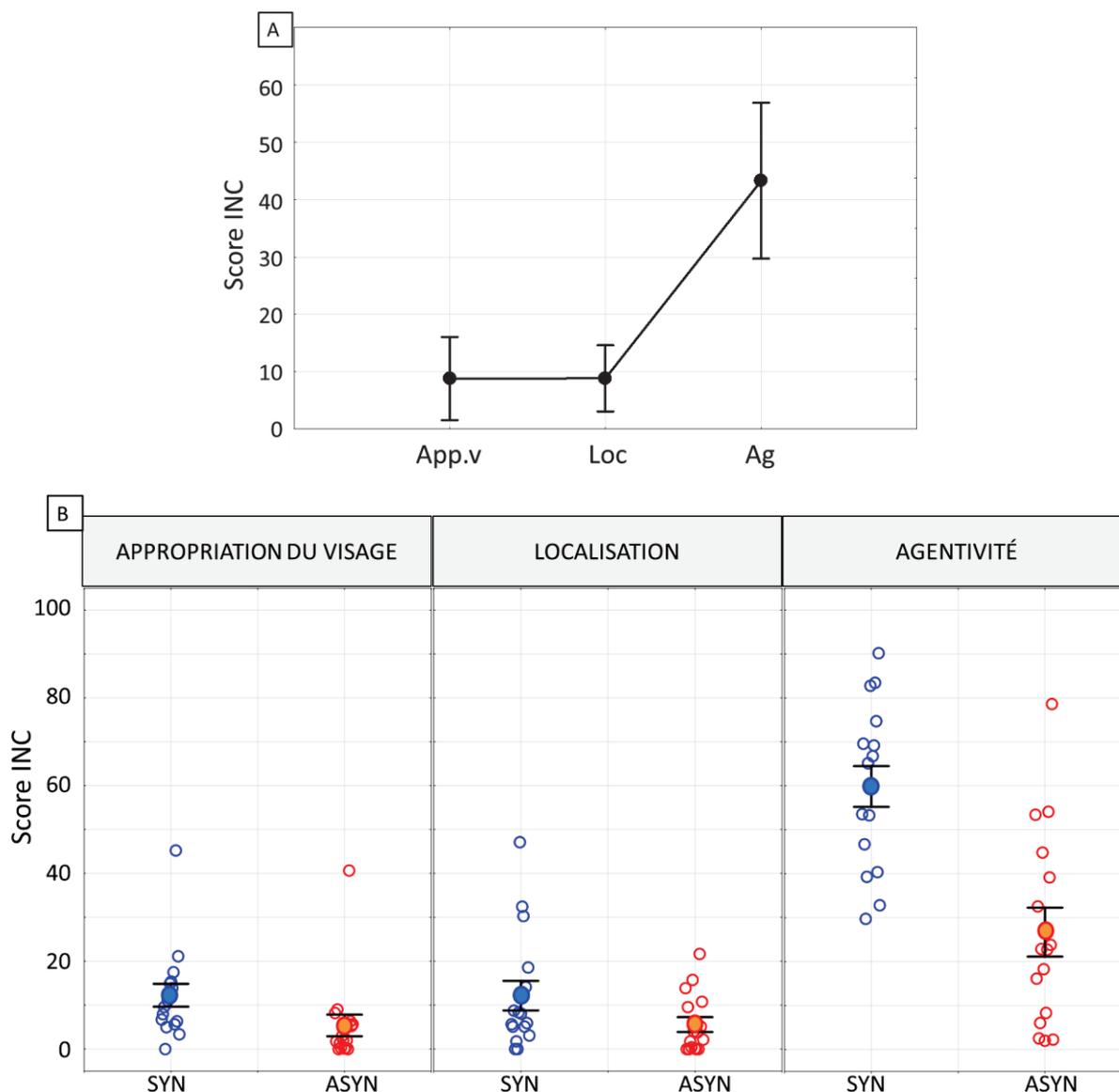
Pour chaque catégorie d'incorporation, le niveau d'incorporation est significativement supérieur à 0 en statique (Test T par rapport à la valeur référente qui est 0) : App.v ( $p \leq 0,001$ ) ; Loc ( $p = 0,0031$ ) ; Ag ( $p \leq 0,001$ ). De même en synchrone, le niveau d'incorporation est significativement supérieur à 0 : App.v ( $p \leq 0,001$ ), Loc ( $p \leq 0,01$ ), Ag ( $p \leq 0,001$ ). Ainsi, une sensation d'incorporation non nulle est observée dans les deux conditions, SYN et ASYN. Les moyennes des scores d'incorporation par catégorie sont présentées dans le Tableau 3-9 en fonction de l'état de synchronie.

Catégories d'Incorporation	Moyenne des scores SYN (%)	Moyenne des scores ASYN (%)
<b>App.v</b>	11,26±4,64	5,36±4,89
<b>Loc</b>	13,92±8,45	6,41±3,08
<b>Ag</b>	59,85±9,29	26,72±11,15

**Tableau 3-9 : Moyenne des scores et déviation standard pour les différentes catégories d'incorporation en condition SYN et ASYN.**

Comme le montre la Figure 3-21, le score INC varie significativement en fonction de l'État du Robot (effet principal  $ROB.État : F(1,16) = 18,57, p < 0,001, \eta^2 = 0,54, \alpha = 0,981$ ) et de la Catégorie d'Incorporation (effet principal du facteur  $CAT : F(2,32) = 54,66, p < 0,001, \eta^2 = 0,77, \alpha = 1$ ), indépendamment du Type de Robot ( $F(1,16) = 1,06, p > 0,25 ; \eta^2 = 0,062$ ). On a ( $\langle INC_{SYN} \rangle = 28,08 \pm 10,66 ; \langle INC_{ASYN} \rangle = 12,55 \pm 10,13$ ).

De manière intéressante, on observe également un effet d'interaction significatif entre les facteurs État du Robot et Catégorie d'Incorporation (effet d'interaction  $ROB.État \times CAT : (F(2,32) = 19,81, p < 0,001 ; \eta = 0,55, \alpha = 0,999)$ ), comme l'illustre la Figure 3-21. La comparaison des moyennes par le test *post-hoc* de Bonferroni met en évidence que l'effet d'incorporation du sujet dans le robot, plus élevé lorsque les mouvements du sujet et du robot sont synchrones, est significativement plus important pour une incorporation par agentivité Ag comparativement à l'appropriation des traits du visage App.v ( $p < 0,001$ ) ou à la localisation Loc ( $p < 0,001$ ). De plus, on notera que les scores App.v et Loc sont indépendants de l'état du robot ( $p > 0,25$ ) alors que le score Ag augmente de manière significative en condition SYN comparativement à la condition ASYN, ( $p < 0,001$ ).



**Figure 3-21 :** *A) Effet principal de la catégorie d'incorporation (CAT) sur la variable incorporation dans l'expérience FaceVM. Représentation graphique de la moyenne des scores d'incorporation (INC), exprimée en pourcentage, en fonction des catégories d'incorporation, i.e., Appropriation du visage (App.v), Localisation (Loc), Agentivité (Ag). B) Interaction État du Robot x Catégorie d'Incorporation sur la variable INC. Représentation graphique de la moyenne des scores CAT, exprimée en pourcentage, en fonction du facteur état du robot ROB.État (SYN vs ASYN) pour chaque catégorie d'incorporation. La moyenne est représentée par un symbole rond plein et la barre d'erreur par le trait vertical associé (erreur standard).*

### 3.3.5. La variable d'Inférence des États Internes

Une analyse statistique à l'aide du test non paramétrique de Spearman a été menée, sujet par sujet. Deux sujets présentent le résultat attendu, c'est-à-dire, une corrélation significative

des scores sujet-robot en synchrone uniquement. Cela représente 12,5 % des sujets et ce sont les sujets 1 et 3 :

- Pour le premier sujet, nous observons une corrélation significative entre soi et autre en synchrone ( $R_{\text{spearman}} = 0,549$ ,  $p < 0,05$ ), et pas de corrélation entre soi et autre en asynchrone ( $R_{\text{spearman}} = 0,436$ ,  $p = 0,079$ ).
- Pour le troisième sujet, nous observons une corrélation significative entre soi et autre en synchrone ( $R_{\text{spearman}} = 0,588$ ,  $p < 0,05$ ), et pas de corrélation entre soi et autre en asynchrone ( $R_{\text{spearman}} = 0,291$ ,  $p > 0,25$ ).

Dans une analyse question par question, seule la question « *Avez-vous fait du bénévolat pour une organisation sociale, communautaire ?* » donne le résultat attendu, ce qui correspond à environ 6 % des questions.

### 3.3.6. Résultats de l'analyse des corrélations entre les variables d'incorporation et de cognition sociale

Contrairement aux expériences en situation de téléprésence, l'analyse des corrélations entre les variables d'incorporation selon la catégorie et les composantes de cognition sociale n'a révélée aucune corrélation significative entre ces variables, mesurées en situation de face-à-face. On relèvera, en condition synchrone, les coefficients des droites de régression entre les variables  $INC_g$  et  $ISA$  ( $r = 0,412$ ,  $p = 0,112$ ) et, en condition asynchrone,  $INC_{Loc}$  et  $ISA$  ( $r = 0,411$ ,  $p = 0,0036$ ),  $INC_{Ag}$  et  $ISA$  ( $r = 0,410$ ,  $p = 0,107$ ) et entre  $INC_{Ag}$  et  $ISA$  ( $r = 0,413$ ,  $p = 0,109$ ).

### 3.3.7. Les variables représentatives des mouvements de la tête

L'analyse de variance des variables représentatives des mouvements de la tête, dont les résultats sont dans le tableau 3-10, confirment ce qui a été observé dans les expériences précédentes : elles ne dépendent pas de l'état de synchronie. Les moyennes des amplitudes des angles de rotation tangage et lacet,  $A_T$  et  $A_L$ , et leur dispersion,  $DISP_{AT}$  et  $DISP_{AL}$ , sont indépendantes de l'état de synchronie du robot.

<i>Lacet</i>	<i>SYN</i>	<i>ASYN</i>	<i>F(1,10)</i>	<i>p</i>	$\eta^2$
$A_L$ (°)	30,33±4,32	29,99±7,75	1,23	> 0,25	0,170
$DISPA_L$ (°)	16,34±5,88	15,48±4,14	0,06	> 0,25	0,010
$\Delta AG_L$ (°)	74,90±14,722	72,55±14,72	0,01	> 0,25	0,016
$NM_L$	23,31±5,58	22,69±4,99	0,28	> 0,25	0,045
<i>Tangage</i>	<i>SYN</i>	<i>ASYN</i>	<i>F(1,10)</i>	<i>p</i>	$\eta^2$
$A_T$ (°)	20,94±6,60	17,62±3,62	0,04	> 0,25	0,006
$DISPA_T$ (°)	9,33±2,76	9,00±2,97	0,16	> 0,25	0,026
$\Delta AG_T$ (°)	47,91±16,17	40,43±7,40	2,25	0,18	0,273
$NM_T$	21,62±4,23	20,12±4,37	3,48	0,11	0,367

**Tableau 3-10 : Résultats de l'analyse de variance des variables représentatives des mouvements de tête en fonction de l'état de synchronie entre les mouvements de tête du sujet et du robot.** Les variables amplitude des angles de rotation  $A_L$  et  $A_T$  et leur dispersion  $DISPA_L$  et  $DISPA_T$ ; Les différences du minimum et du maximum d'amplitude,  $\Delta AG_L$  et  $\Delta AG_T$ , et les nombres de mouvements  $NM_L$  et  $NM_T$  sur la globalité des séquences libres pour chacun des deux angles de rotation *Lacet* et *Tangage*.

Concernant le nombre de mouvement et la variation globale d'amplitude, les moyennes de la variation globale d'amplitude,  $\Delta AG_L$  et  $\Delta AG_T$ , et celles du nombre de mouvements,  $NM_L$  et  $NM_T$ , sont aussi indépendantes de l'état de synchronie du robot sur l'ensemble des deux séquences libres.

L'ensemble des résultats confirme que les variables caractéristiques des mouvements de rotation de la tête du sujet en séquence libre sont indépendantes de la synchronie entre les mouvements de tête du sujet et du robot.

### 3.3.8. Synthèse des résultats de l'expérience FaceVM (Synchrone versus Asynchrone)

Lorsque l'interaction entre le sujet et le robot se fait en face-à face, la sensation d'incorporation est renforcée significativement uniquement à travers le contrôle du mouvement,

et ce, particulièrement lorsque le sujet et le robot effectuent des mouvements synchrones. La sensation de délocalisation dans le robot et la sensation d'appropriation des traits du visage du robot ne sont pas nulles mais nettement plus faibles et semblables quelle que soit la synchronie. De manière intéressante, les mouvements synchrones entre le sujet et le robot induisent toujours une affinité envers le robot significativement plus grande.

Finalement, les expériences visuo-motrices mettent en évidence le fait que la sensation d'incorporation du sujet dans le robot est présente, quelle que soit la synchronie et la situation d'interaction homme-robot. Ces expériences montrent aussi que, des mouvements synchrones entre le robot et le participant augmentent la sensation d'incorporation, notamment à travers l'agentivité et le sentiment de délocalisation. En revanche, du point de vue des composantes de cognition sociale du sujet, les effets mesurés, en face à face, sont diminués comparativement à la situation de téléprésence. De plus, des corrélations significatives entre la sensation d'incorporation et les composantes de cognition sociale ont été mises en évidence en situation de téléprésence uniquement. Ainsi, le miroir paraît être un vecteur d'information cognitive implicite du soi renforçant les composantes de cognition sociale et ainsi l'acceptabilité du robot. Par ailleurs, l'ensemble des variables étudiées en condition visuo-motrice semblent indépendantes du type de robot avec lequel interagit le sujet. Soulignons que, comme attendu, les mouvements de tête du participant lors des séquences libres ne sont pas influencés par la synchronie des mouvements entre lui et le robot.

Afin d'explorer les mécanismes des représentations de soi et de cognition sociale qui sous-tendent les observables étudiées dans les expériences visuo-motrices d'interaction homme-robot, et notamment de déterminer les rôles respectifs des informations sensorielles et motrices dans la plasticité de la représentation de soi, nous allons poursuivre ces investigations en changeant avec des manipulations non plus sensorimotrices mais sensorielles pures.

## Chapitre 4 : Expériences Visuo-Tactiles

Des expériences antérieures (Sforza *et al.*, 2010 ; Tajadura-Jiménez *et al.*, 2012, 2014) ont permis de montrer que la congruence et la synchronisation des stimulations visuo-tactiles sur deux sujets se faisant face provoquent une illusion de soi sur l'autre visage. Dans les expériences sensorimotrices présentées précédemment, un sujet et un sujet-robot étaient en interaction, soit dans une situation de téléportation robotique, soit dans une situation de face à face. La sensation d'incorporation du sujet dans le robot, induite par des mouvements de la tête du sujet, s'est principalement révélée dans la composante agentivité, c'est-à-dire dans une sensation de contrôler les mouvements du robot. Sur la base de ces premières observations, la question était de savoir si la spécificité de la sensation observée, notamment l'agentivité, était liée à la modalité motrice de l'induction d'incorporation utilisée. Pour répondre à cette question, nous avons étudié, dans une seconde série d'expériences, les effets d'une induction sensorielle sur les processus d'incorporation. Afin de comparer les effets de manipulations motrices versus sensorielles, nous avons utilisé des stimulations tactiles simultanées du visage du robot et celui du sujet, en situation de téléprésence et en situation face à face.

Le deuxième axe développé dans ce chapitre se focalisera donc sur les conséquences d'une stimulation visuo-tactile sur la sensation d'incorporation et sur la représentation de soi qui en découle, mais aussi sur les composantes de la cognition sociale. Afin d'approfondir les effets de stimulation sensorielle sur la sensation d'appropriation, nous avons élargi le questionnaire sur le sentiment d'appropriation à d'autres régions corporelles que celles du visage. Ainsi, nous distinguerons les différentes modalités d'incorporation telles que l'appropriation du corps du robot, l'appropriation des traits du visage, la délocalisation du sujet dans le robot, et le contrôle du mouvement. Du point de vue de la cognition sociale, comme précédemment, nous étudierons les conséquences de ces stimulations visuo-tactiles sur l'acceptabilité du robot à travers la mesure de la sympathie et de l'affinité du sujet vis-à-vis du robot.

Les expériences présentées dans ce chapitre seront décrites successivement suivant le même canevas, à savoir la présentation des objectifs et des hypothèses, la description du

matériel et des méthodes incluant le protocole expérimental, l'analyse des données, et enfin la présentation des résultats. La première expérience présentée dans ce chapitre, à savoir l'expérience de téléprésence en modalité visuo-tactile (TéléVT), a été réalisée à l'Institut Cellules Souches et Cerveau de Bron (INSERM U1208). La deuxième, à savoir l'expérience en situation face-à-face (FaceVT), a été réalisée au Laboratoire Cognition, Action et Plasticité Sensorimotrice (INSERM U1093) de Dijon.

## 1. Expérience 4 (TéléVT : Synchrones vs Asynchrones)

### 1.1. *Objectifs et hypothèses*

La modalité sensorielle choisie ici est une stimulation par déplacement d'un pinceau sur la joue de manière synchrone ou asynchrone entre le visage du sujet et celui du robot. En situation de téléprésence où le robot est face à un miroir, l'objectif de l'expérience est de déterminer si la modalité d'induction sensorielle va modifier ou non les caractéristiques qualitatives et quantitatives des sensations d'incorporation et de cognition sociale, observées en modalité motrice, en particulier, lorsque la stimulation tactile est synchrone. Nous nous proposons notamment de tester l'hypothèse selon laquelle une stimulation visuo-tactile pourrait favoriser la sensation d'appropriation corporelle du robot incluant l'appropriation des traits du visage par le sujet. La procédure de téléprésence s'appuie sur les techniques d'interface homme-robot décrites au chapitre 2 et expérimentées au chapitre 3.

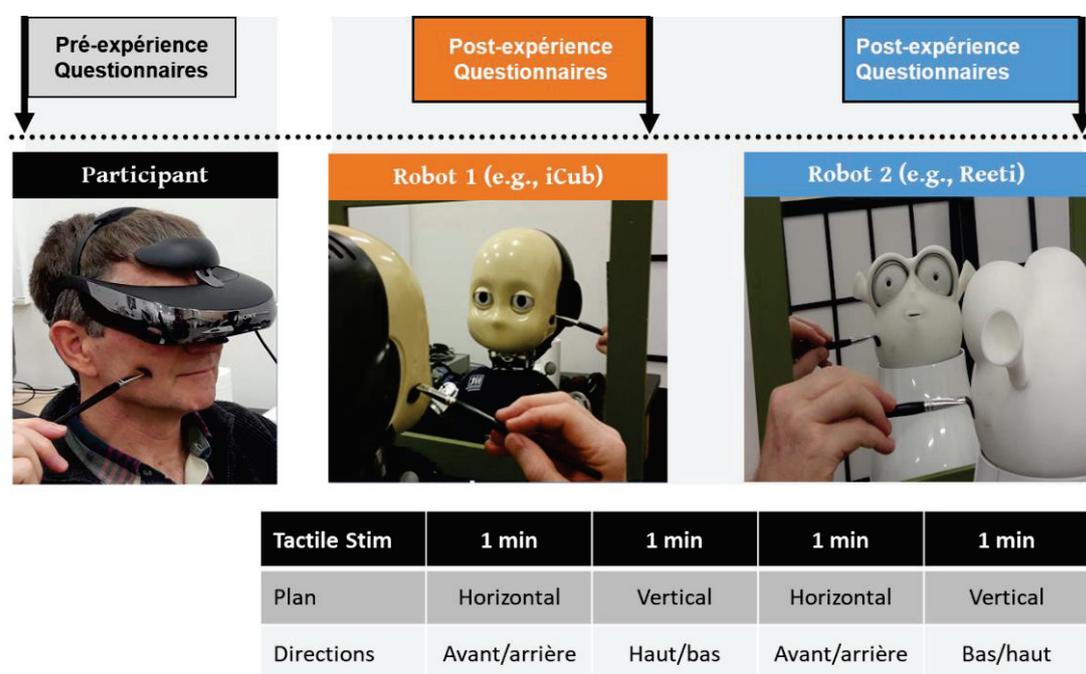
### 1.2. *Matériel et Méthodes*

#### 1.2.1. **Participants**

Pour l'expérience TéléVT (SYN vs ASYN), nous avons testé 24 sujets sains, d'âge moyen 24,0 ans (SD = 4,3), sans déficits ou antécédents neurologiques, psychiatriques ou ORL. Dans la situation tactile, la puissance de notre étude calculée à l'aide du logiciel G\*Power-version 3.1.9.3 est de 0,81. Les sujets recrutés parmi le laboratoire étaient naïfs concernant les hypothèses et les objectifs de l'étude. Ils avaient donné leur consentement éclairé avant l'expérience. L'étude a été réalisée sous agrément (autorisation n° 10028) de la Préfecture de la région Rhône-Alpes autorisant la recherche biomédicale à l'Institut Cellules Souches et Cerveau. L'expérience a été, par ailleurs, réalisée en respectant les principes de la dernière version de la déclaration d'Helsinki (*World Medical Association, 2013*).

### 1.2.2. Le protocole expérimental

Dans l'expérience TéléVT, les robots et le paradigme sont les mêmes que dans l'expérience TéléVM (SYN vs. ASYN) (cf. Figure 3-1). Rappelons brièvement que deux types de robots sont utilisées lors des expériences, *iCub* et *Reeti*. D'un point de vue de l'apparence globale, le robot *iCub* a une forme humanoïde, approximativement la taille d'un enfant de 3 ans, tandis que le robot *Reeti* s'apparente à un personnage de dessin animé. Des caméras vidéo insérées dans les yeux du robot permettent au robot d'explorer l'environnement visuel. Pour implémenter la procédure de téléprésence, une connexion entre le casque HMD de réalité virtuelle posé sur la tête du sujet et les yeux du robot permet au sujet de se voir en tant que robot, un miroir étant placé face au robot. Les manipulations sensorielles sont mises en place via une stimulation tactile à l'aide d'un pinceau au niveau de la joue du sujet et du robot.



**Figure 4-1 : A) Configuration expérimentale de l'expérience de téléprésence TéléVT (SYN vs. ASYN) montrant 1) à gauche, le sujet muni d'un casque HMD de réalité virtuelle et d'un casque audio sur lequel est fixé le capteur de mouvement, 2) au centre, le robot humanoïde *iCub* stimulé sur la joue droite et, 3) à droite, le robot *Reeti*, stimulé sur la joue gauche, faces à un miroir qui permet au sujet de se voir en tant que robot. En bas, le tableau présente les quatre phases successives de la procédure expérimentale effectuées avec chacun des robots en session synchrone ou asynchrone. Chaque phase correspond à la répétition pendant une durée de 1 minute du mouvement d'une stimulation tactile repéré par sa direction et son sens : haut-bas, bas-haut, gauche-droite, droite-gauche. Lors des expériences, les phases de mouvements horizontaux et verticaux sont alternées selon tous les ordres possibles en les contrebalançant au niveau des sujets.**

L'expérience, dont la configuration est schématisée dans la Figure 4-1, se déroule en quatre étapes : la présentation de l'expérience (1), les tests pré-téléprésence (2), les deux sessions de téléprésence robotique incluant des tests spécifiques après chaque session (3) puis les tests post-téléprésence (4).

#### **a. Présentation de l'expérience et des robots**

Le sujet est informé brièvement de l'objectif de la recherche qui consiste à déterminer les conditions optimales d'interactions homme-robot en vue de leurs utilisations futures dans des contextes commercial, médical ou socio-culturel. Le protocole, schématisé dans la Figure 4-1, et les consignes à suivre lors des sessions d'interaction homme-robot et des passations des questionnaires sont ensuite décrites au sujet de manière succincte.

#### **b. Tests pré-téléprésence**

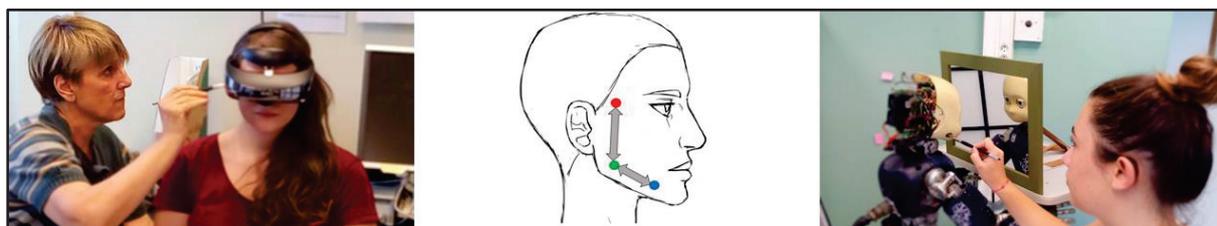
Le sujet est invité à s'asseoir pour répondre à deux questionnaires : le premier questionnaire de sympathie (SYMP.pr) pour chaque robot et le second questionnaire d'inférence sur les états internes (IEI.self).

#### **c. Session de téléprésence robotique**

Le sujet est assis dans la pièce d'expérimentation de façon à être hors du champ visuel du robot et par conséquent non visible par ce dernier, pendant tout le déroulé de l'expérience. Le casque de réalité virtuelle est installé sur la tête du sujet qui se trouve alors immédiatement téléporté dans l'environnement visuel du robot. Afin d'isoler le sujet du bruit extérieur, nous positionnons sur sa tête un casque audio. Une fois installé en situation de téléprésence robotique, le sujet est libre d'explorer l'environnement visuel du robot. Pour renforcer la sensation d'incorporation, un miroir, positionné sur une tablette mobile, est placé à une distance de 20 cm, en face et à hauteur du visage du robot. Le sujet se voit par conséquent en tant que robot dans le miroir comme s'il était à une distance de 40 cm de ce dernier.

Pour chaque sujet, l'expérience consiste en deux sessions expérimentales de téléprésence robotique, successivement avec chacun des deux robots. Dans une des sessions, le sujet est stimulé tactilement par le déplacement d'un pinceau sur sa joue de manière synchrone à la

stimulation du robot, c'est la session synchrone (SYN), et dans l'autre session, le sujet est stimulé tactilement avec un décalage d'une seconde par rapport à la stimulation du robot, c'est la session asynchrone (ASYN). Les stimulations tactiles sont réalisées par deux expérimentateurs : un expérimentateur est assis à côté du sujet et un autre expérimentateur à côté du robot, de manière à ce que le sujet ne perçoive que le pinceau en mouvement. Les deux expérimentateurs ont, dans leur champ de vision, un écran d'ordinateur non visible par le sujet et sur lequel est présenté une cible en mouvement qui indique à chacun le point de départ, la direction (horizontale ou verticale), et le rythme (la fréquence) de la stimulation. Par ailleurs, de par leur position, chaque expérimentateur peut contrôler visuellement l'adéquation des stimuli tactiles (mouvements des pinceaux) appliqués sur les visages du sujet et du robot. Avant le début des expériences, les deux expérimentateurs ont réalisé plusieurs séances d'entraînement jusqu'à posséder tous deux une parfaite maîtrise des caractéristiques spatio-temporelles de stimulations tant synchrones qu'asynchrones. Les stimulations tactiles concernent les régions cutanées de la joue droite ou gauche, en regard de la mandibule inférieure pour les déplacements horizontaux et dans le plan des yeux pour les déplacements verticaux, pour le sujet humain comme pour le robot (Figure 4-2). Dans ces conditions, le sujet perçoit, dans le miroir, le visage du robot stimulé par un pinceau en même temps que lui-même ressent une stimulation tactile analogue.



**Figure 4-2 : Sens et direction des stimulations tactiles de la joue présentée comme exemple en situation de téléprésence (Crédit photos @PeterDominey).**

Afin d'éviter tout biais expérimental qui serait lié à une attente concernant le type de stimulation tactile, il est mentionné au sujet que, lui et le robot, vont être stimulés tactilement au niveau de la joue dans des sens et directions semblables ou non. Le sujet a pour consigne de porter son attention sur le visage du robot, la stimulation tactile de celui-ci, ainsi que celle ressentie sur son propre visage.

<i>Condition</i>	<i>Synchrone</i>								<i>Asynchrone</i>							
<i>Robot</i>	Reeti				iCub				Reeti				iCub			
<i>Ordre</i>	I		II		I		II		I		II		I		II	
<i>Côté</i>	D	G	D	G	D	G	D	G	D	G	D	G	D	G	D	G
<i>Nombre</i>	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

**Tableau 4-1 : Randomisation des sujets pour l'expérience TéléVT (Synchrone versus Asynchrone).** Les lettres D et G représentent le côté de la joue stimulée tactilement, droite ou gauche, respectivement.

La session expérimentale de téléprésence se déroule en quatre phases successives de stimulation de la joue du sujet, comme illustré dans la Figure 4-1. Chacune de ces phases est composée d'une répétition d'un des mouvements suivants, sur une durée d'une minute : haut-bas, bas-haut, gauche-droite et droite-gauche. Puis, le sujet est invité à s'asseoir devant une table afin de répondre aux questionnaires d'Interaction Soi-Autruï, d'Incorporation, et d'Inférence sur les États Internes correspondant au robot avec lequel il vient d'interagir (IEI.rob). Il est ensuite à nouveau installé, face au robot, comme au début de la première session de téléprésence (TPR1). Cette deuxième session de téléprésence (TPR2) se déroule de la même manière que la session décrite précédemment, en 4 phases successives, seuls diffèrent la synchronie de la stimulation tactile (SYN/ASYN) et le type de robot.

#### **d. Test post-téléprésence**

Après les deux sessions expérimentales de téléprésence robotique incluant les questionnaires ISA, INC et IEI, le sujet doit répondre au dernier questionnaire de sympathie (SYMP.pst). L'expérimentation se termine par un *debriefing*, consistant en une série de questions adressées au sujet sur l'expérience, et plus particulièrement, sur les éventuelles sensations d'incorporation dans le robot.

### **1.2.3. Les questionnaires**

Les sujets sont ainsi invités à répondre à différents questionnaires afin de quantifier les degrés d'acceptation sociale et d'incorporation dans le robot. Ces questionnaires, présentés au sujet à des moments différents de l'expérience, permettent de mesurer plusieurs variables

dépendantes : la Sympathie en début et en fin d'expérience, soit avant et après les deux sessions de téléprésence robotique, l'Inclusion Soi-Autruï, l'Incorporation après chaque session expérimentale, et l'Inférence sur les États Internes avant la première session et après chaque session expérimentale. Les questionnaires SYMP, ISA et IEI sont exactement les mêmes que pour les expériences avec tâche motrice, seul le questionnaire d'incorporation diffère.

Ce questionnaire d'incorporation, présenté dans la Figure 4-3, mesure le niveau d'incorporation au sein du robot par une évaluation sur une échelle subjective située entre 0 et 100. En cochant la ligne en un point situé entre 0 et 100, le sujet indique le niveau d'incorporation ressentie lors de l'expérience tel que la phrase la décrit. Afin d'approfondir les effets de stimulation sensorielle sur la sensation d'appropriation, nous avons élargi le questionnaire sur le sentiment d'appropriation. Une nouvelle catégorie de questions a été introduite, liée à l'appropriation du corps ou *ownership*. Le score d'incorporation est évalué au travers de quatre catégories d'affirmations portant sur :

- La sensation que le corps ou une partie du corps du robot appartient au sujet –*ownership*– (App), soit l'appropriation du corps du robot par le sujet, mesuré par 3 questions.
- La sensation que son visage ressemble à celui du robot –*enfacement*– (App.v), soit l'appropriation des traits du visage (sensation se rapprochant de l'appropriation du corps définie précédemment) mesurée par 6 questions.
- La sensation d'être à l'emplacement du robot –*location*–, soit la localisation (Loc), c'est-à-dire, la situation spatiale du sujet/robot, mesurée par 4 questions.
- La sensation de contrôler le mouvement du robot –*agency*–, soit l'agentivité (Ag) qui, plus précisément, traduit la sensation de contrôle moteur qu'exerce le sujet sur le robot, mesurée par 5 questions.

Le score de chaque catégorie est le résultat de la moyenne des scores obtenus dans les réponses aux questions correspondant à cette catégorie. Ce questionnaire de 18 questions est remis au sujet après chaque session expérimentale. C'est une adaptation du test d'incorporation de l'illusion de la main en caoutchouc RHI « *Rubber Hand Illusion* » (Botvinik & Cohen 1998). La répartition des questions selon les 4 catégories s'appuie sur les travaux de Gonzalez-Franco & Peck (Gonzalez-Franco, 2018).

Date: \_\_\_\_\_ Nom, Prénom: \_\_\_\_\_

1. J'avais l'impression de me regarder dans le miroir 0 100

2. J'avais l'impression que mon visage commençait à ressembler à celui du robot 0 100

3. J'avais l'impression de pouvoir contrôler la tête du robot 0 100

4. J'avais l'impression que le visage du robot commençait à ressembler au mien 0 100

5. J'avais l'impression de ne plus contrôler mon visage 0 100

6. J'avais l'impression d'être à la place du robot. 0 100

7. J'avais l'impression que si je fais des expressions faciales, le robot fera les mêmes expressions faciales 0 100

8. J'avais l'impression de pouvoir diriger les yeux du robot 0 100

9. J'avais l'impression que la tête du robot était une partie de mon corps 0 100

10. J'avais l'impression que ma peau était devenue pale 0 100

11. J'avais l'impression que ma position changeait plusieurs fois entre mon corps et le corps du robot 0 100

12. J'avais l'impression que les mouvements de tête du robot pourraient reproduire mes propres mouvements 0 100

13. J'avais l'impression que mon nez était plus petit 0 100

14. J'avais l'impression que la tête du robot était ma propre tête 0 100

15. J'avais envie de bouger en tant que robot 0 100

16. J'avais l'impression que le contact que j'ai senti sur mon visage était causé par le pinceau touchant le visage du robot 0 100

17. J'avais l'impression que ma peau avait une texture plastifiée 0 100

18. J'avais l'impression d'être transporter à l'intérieur du robot 0 100

Commentaires

**Figure 4-3 :** Les différentes affirmations du test d'incorporation associées aux quatre catégories d'incorporation étudiées dans les expériences TéléVT et FaceVT. En noir, l'appropriation du corps (App) (3 questions), en rouge, l'appropriation des traits du visage (App.v) (5 questions), en vert, la localisation ou situation spatiale du sujet/robot (Loc) (4 questions), et en violet, l'agentivité (Ag) (6 questions).

#### 1.2.4. Analyse statistique des réponses aux questionnaires

Des analyses statistiques ont été menées après traitement des données des réponses aux questionnaires. Rappelons que les variables mesurées sont le score de sympathie, le score

d'inférence des états internes, le score d'inclusion Soi-Autruï et le score d'incorporation. À la différence des expériences visuo-motrices, le facteur lié à l'état de synchronie devient le facteur État de la stimulation (*STIM.État*) à deux modalités, Synchronie (SYN)/Asynchrone (ASYN) ; et le facteur Catégorie d'Incorporation (CAT) a maintenant quatre modalités : l'appropriation corporelle (App), l'appropriation des traits du visage (App.v), la localisation (Loc) et l'agentivité (Ag). Rappelons que les autres facteurs restent inchangés, à savoir les facteurs Rob.Type et PREPOST.

Des études de normalité et d'homogénéité des variances de chaque variable ont été effectuées à partir du test de Kolmogorov-Smirnov et du test de Levene, respectivement. Dans l'expérience décrite ici, la distribution des données répondait aux hypothèses de normalité et d'homogénéité de la variance à  $p > 0,05$ . Des analyses de variances ANOVA et des tests paramétriques statistiques ont alors été réalisées avec le progiciel STATISTICA (v12, Statsoft Inc., Tulsa, OK, USA) pour les scores SYMP, ISA et INC. Lorsqu'un effet principal ou une interaction étaient significatifs après l'analyse de variance, des comparaisons *a posteriori* (*post-hoc*) utilisant le test de Bonferroni ont été effectuées, basées sur la comparaison de toutes les moyennes deux à deux. Pour la variable INC, une procédure Test T pour échantillon unique a été utilisée afin de tester si la moyenne du score INC diffère d'une constante spécifiée, en l'occurrence, la valeur nulle. Pour la variable IEI, la distribution de la variable binaire n'étant pas gaussienne, les scores IEI ont été corrélés entre les réponses « soi » et « autre » avec un test de Spearman (distribution non gaussienne des variables binaires).

### 1.3. Résultats

#### 1.3.1. Hypothèses opérationnelles

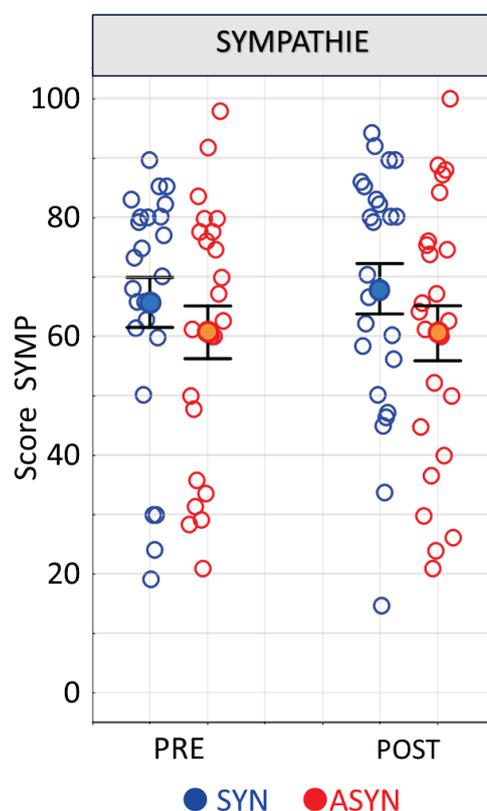
Compte tenu des objectifs présentés précédemment, nous formulons ici l'hypothèse suivante pour l'expérience TéléVT :

**Hypothèse 1 :** *Lors de manipulations purement sensorielles –des caresses des deux visages sujet et robot–, nous émettons l'hypothèse, qu'en téléprésence robotique, la sensation d'appartenance incluant l'appropriation des traits du visage est comparable ou supérieure à la sensation d'agentivité.*

**Hypothèse 2 :** Lors de manipulations purement sensorielles –des caresses des deux visages sujet et robot–, nous émettons l’hypothèse, qu’en téléprésence robotique, les composantes de cognition sociale sont impactées par l’incorporation.

### 1.3.2. La variable Sympathie

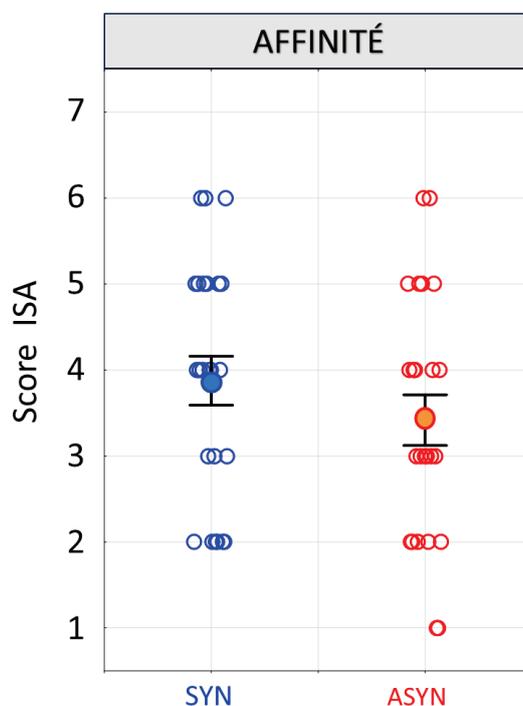
De manière différente des expériences TéléVM (SYN vs. ASYN) et TéléVM (SYN vs. STA), nous n’observons pas d’effet significatif sur la variable SYMP ni de l’état de synchronie de la stimulation ( $STIM\text{-}État : F(1,22) = 0,18, p > 0,25, \eta^2 = 0,008$ ) ni de la situation PREPOST ( $PREPOST : F(1,22) = 0,95, p > 0,25, \eta^2 = 0,41$ ). Lorsque l’on compare les effets de synchronie uniquement en situation expérimentale POST, le score SYMP n’est pas différent entre les états SYN et ASYN ( $STIM\text{-}État : F(1,22) = 1,16, p > 0,25 ; \eta^2 = 0,050$ ) (Figure 4-4).



**Figure 4-4 :** Représentation graphique de la moyenne des scores SYMP mesurés dans l’expérience TéléVT (SYN vs ASYN) avant (PRE) et après (POST) téléprésence en fonction du facteur état de la stimulation (STIM.État : SYN, ASYN). La moyenne, exprimée en pourcentage, est représentée par un symbole rond plein, et la barre d’erreur par le trait vertical associé (erreur standard).

### 1.1.1. La variable Inclusion Soi-Autruï

De nouveau, en condition TÉLÉ-VT, l'état de synchronie de la stimulation n'a pas d'effet significatif sur la variable ISA ( $STIM.État : F(1,22) = 1,43, p = 0,24, \eta^2 = 0,061$ ) (Figure 4-5).



*Figure 4-5 : Représentation graphique de la moyenne des scores de la variable Inclusion Soi-Autruï dans l'expérience TéléVT, mesurés après chaque session en téléprésence en fonction du facteur État de la stimulation, synchrone (SYN) vs asynchrone (ASYN). La moyenne est représentée par un symbole rond plein et la barre d'erreur par le trait vertical associé (erreur standard).*

### 1.3.3. La variable Incorporation

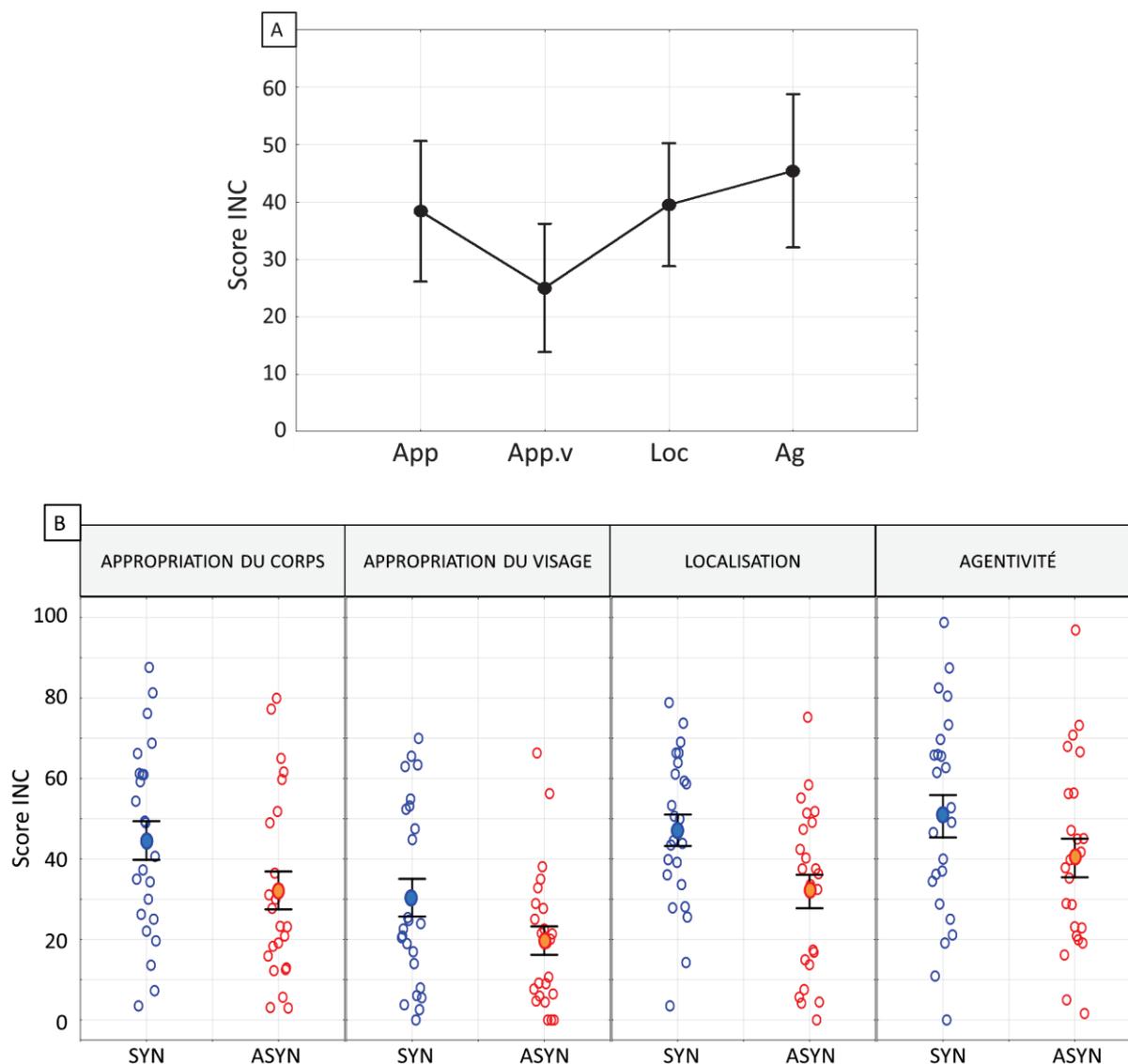
Pour chaque catégorie d'incorporation, le niveau d'incorporation est significativement supérieur à 0 en condition ASYN et SYN et pour toutes les catégories (Test T par rapport à la valeur référente qui est 0 :  $p \leq 0,001$ ). Ainsi, une sensation d'incorporation significative est ressentie, quelle que soit l'aspect synchrone ou asynchrone des stimulations sensorielles et quelle que soit la catégorie d'incorporation étudiée. Les moyennes des scores des différentes catégories d'incorporation obtenues, en condition SYN et ASYN, sont présentées dans le tableau 4-2.

Catégories d'Incorporation	Moyenne des scores SYN (%)	Moyenne des scores ASYN (%)
App	44,58±10,07	32,19±9,92
App.v	30,36±9,94	19,71±7,47
Loc	47,14±8,24	31,91±8,56
Ag	50,62±10,83	40,25±10,19

**Tableau 4-2 : Moyennes des scores et déviation standard pour les différentes catégories d'incorporation en condition SYN et ASYN.**

Comme le montrent les Figures 4-6 A et 4-6 B, le score INC varie significativement en fonction de l'état de la stimulation (effet principal *STIM.État* :  $F(1,22) = 17,23$ ,  $p < 0,001$ ,  $\eta^2 = 0,439$ ,  $\alpha = 0,977$ ) et de la catégorie d'Incorporation (effet principal du facteur *CAT* :  $F(3,66) = 10,70$ ,  $p < 0,001$ ,  $\eta^2 = 0,327$ ,  $\alpha = 0,998$ ), indépendamment du type de robot ( $F(1,22) = 0,036$ ,  $p > 0,25$ ;  $\eta^2 = 0,002$ ,  $\alpha = 0,054$ ). De manière différente à la situation motrice, l'interaction *STIM.État*  $\times$  *CAT* est non significative dans la situation tactile (interaction *STIM.État*  $\times$  *CAT* :  $F(1,22) = 1,27$ ,  $p > 0,25$ ,  $\eta^2 = 0,054$ ,  $\alpha = 0,323$ ). Soulignons dans la Figure 4-6 B que cet effet d'incorporation est systématiquement plus élevé lorsque les mouvements du sujet et du robot sont synchrones.

La comparaison des moyennes par le test *post-hoc* de Bonferroni met en évidence que l'effet d'incorporation du sujet dans le robot est significativement diminué pour une incorporation par appropriation des traits du visage, comparativement à l'appropriation corporelle ( $p = 0,003$ ), à la localisation ( $p = 0,001$ ) et à l'agentivité ( $p < 0,001$ ).



**Figure 4-6 :** *A) Effet principal de la catégorie d'incorporation (CAT) sur la variable incorporation dans l'expérience TéléVT. Représentation graphique de la moyenne des scores INC, exprimée en pourcentage, pour chaque catégorie d'incorporation, i.e., Appropriation du corps (App), Appropriation des traits du visage (App.v), Localisation (Loc), Agentivité (Ag). B) Représentation graphique de la moyenne des scores INC, exprimée en pourcentage, en fonction du facteur État de la stimulation STIM.État (SYN vs ASYN) pour chaque catégorie d'incorporation. La moyenne est représentée par un symbole rond plein et la barre d'erreur par le trait vertical associé (erreur standard).*

#### 1.3.4. La variable d'Inférence des États Internes

Une analyse statistique à l'aide du test non paramétrique de Spearman a été menée, sujet par sujet et question par question. 16,7 % des sujets présentent les résultats attendus, c'est-à-dire

une corrélation significative des scores sujet-robot en synchrone et non significative en asynchrone. Ce sont les sujets 5, 6, 8 et 13 :

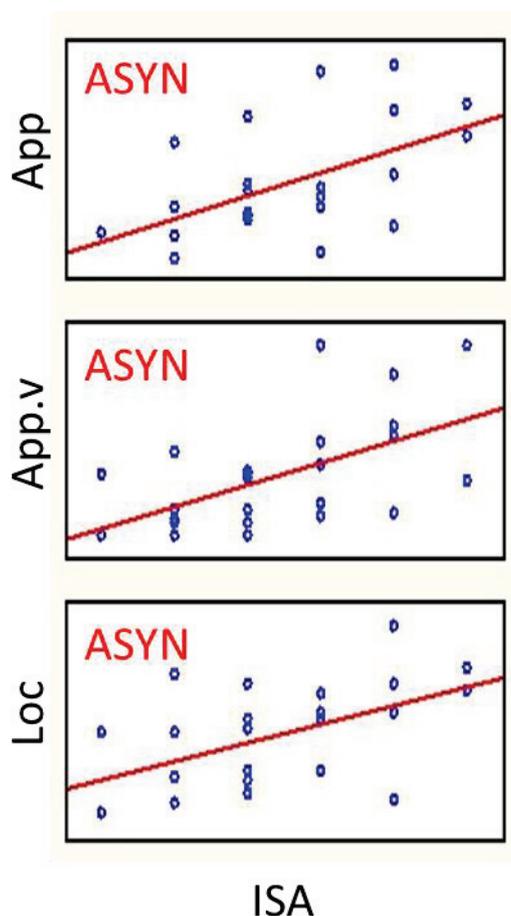
- Pour le cinquième sujet, nous observons une corrélation significative entre soi et autre en synchrone ( $R_{\text{spearman}} = 0,537, p = 0,026$ ), et pas de corrélation entre soi et autre en asynchrone ( $R_{\text{spearman}} = -0,227, p > 0,25$ ).
- Pour le sixième sujet, nous observons une corrélation significative entre soi et autre en synchrone ( $R_{\text{spearman}} = 0,522, p = 0,038$ ), et pas de corrélation entre soi et autre en asynchrone ( $R_{\text{spearman}} = 0,200, p > 0,25$ ).
- Pour le huitième sujet, nous observons une corrélation significative entre soi et autre en synchrone ( $R_{\text{spearman}} = 0,540, p = 0,025$ ), et pas de corrélation entre soi et autre en asynchrone ( $R_{\text{spearman}} = -0,09, p > 0,25$ ).
- Pour le treizième sujet, nous observons une corrélation significative entre soi et autre en synchrone ( $R_{\text{spearman}} = 0,764, p < 0,001$ ), et pas de corrélation entre soi et autre en asynchrone ( $R_{\text{spearman}} = -0,188, p > 0,25$ ).
- Notons que pour le quatorzième sujet, nous observons une corrélation significative entre soi et autre en synchrone ( $R_{\text{spearman}} = 0,685, p = 0,0024$ ) mais aussi une corrélation significative entre soi et autre en asynchrone ( $R_{\text{spearman}} = 0,523, p = 0,029$ ). De même, pour le quinzième sujet, nous observons une corrélation significative entre soi et autre en synchrone ( $R_{\text{spearman}} = 0,553, p = 0,034$ ) mais aussi une corrélation significative entre soi et autre en asynchrone ( $R_{\text{spearman}} = 0,887, p < 0,001$ ).

Dans l'analyse question par question, aucune question ne donne le résultat attendu.

### 1.3.5. Résultats de l'analyse des corrélations entre les variables d'incorporation et de cognition sociale

L'analyse des corrélations entre les variables d'incorporation selon la catégorie et les composantes de cognition sociale, mesurées en condition synchrone, n'a révélée aucune corrélation significative entre ces variables. Par contre, en condition asynchrone, les diagrammes de corrélation arborent plusieurs corrélations positives au seuil de significativité  $p = 0,0125$ , comme illustré sur la Figure 4-7. De force relativement modérée, soulignons cependant que ces corrélations mettent en évidence que seule l'affinité est corrélée avec trois des catégories d'incorporation, l'appartenance du corps, l'appropriation des traits du visage, et

la localisation :  $INC_{App}$  et ISA ( $r = 0,575$ ,  $p = 0,003$ ),  $INC_{App.v}$  et ISA ( $r = 0,560$ ,  $p = 0,004$ ),  $INC_{Loc}$  et ISA ( $r = 0,522$ ,  $p = 0,009$ ).



**Figure 4-7 :** *Corrélations positives en condition asynchrone entre la variable d’incorporation selon la catégorie (App.v, Loc, Ag) et la variable de cognition sociale ISA, tracées à partir des données de l’expérience TéléVT (ASYN). Les droites de régression, tracées en rouge, correspondent aux corrélations significatives de Pearson au seuil de significativité de 0,0125.*

### 1.3.6. Synthèse des résultats de l’expérience TéléVT (Synchrone vs. Asynchrone)

Lorsque l’illusion d’incorporation dans un robot est induite par manipulation visuo-tactile, la sympathie et l’affinité du sujet vis-à-vis du robot restent inchangées après téléprésence robotique. La sensation d’incorporation —mesurée à travers quatre composantes, l’appropriation du corps, l’appropriation des traits du visage, la localisation et l’agentivité— reste toujours présente, quel que soit l’état de la stimulation tactile, synchrone ou asynchrone.

Et, elle ne dépend pas du type de robot. De manière intéressante, l'effet de la synchronie des stimulations visuo-tactiles sur la sensation d'incorporation est significatif sur la majorité des catégories testées, notamment l'agentivité, la localisation et l'appropriation du corps. Seule la sensation d'appropriation des traits du visage est d'une intensité inférieure aux autres sensations et reste indépendante de l'information temporelle, synchrone et asynchrone. Ainsi, en situation de téléprésence robotique, une situation de manipulation purement sensorielle apparaît moins spécifique sur l'illusion d'incorporation robotique par rapport à une manipulation sensori-motrice qui, elle, n'affecte que la composante d'agentivité.

Comme dans l'expérience précédente de téléportation, il est probable que le miroir constitue un vecteur sensoriel favorisant l'information cognitive implicite du soi et renforçant la représentation de soi. Afin d'extraire l'effet des facteurs miroir et perspective en 1<sup>ère</sup> personne, nous avons réalisé une dernière expérience explorant les mêmes caractéristiques et paramètres psychologiques en situation d'interaction homme-robot directe face-à-face.

## 2. Expérience 5 (FaceVT : Synchrones vs Asynchrones)

Afin d'étudier les effets du mimétisme tactile proprement dit dans les interactions homme-robot, nous allons dans cette expérience explorer les capacités d'incorporation et les modifications psychologiques qui l'accompagne en situation de face-à-face entre sujet et robot. En éliminant le miroir et son influence sur l'incorporation, nous pourrions étudier si les effets d'appropriation, de délocalisation au sein du robot et d'agentivité sont modifiés. Dans le cas contraire, cela pourra indiquer que la stimulation tactile suffit à produire un effet d'appropriation du corps, d'agentivité et de délocalisation de soi au sein d'un être robotique indépendamment de tout renforcement représentationnel.

### 2.1. *Matériel et Méthodes*

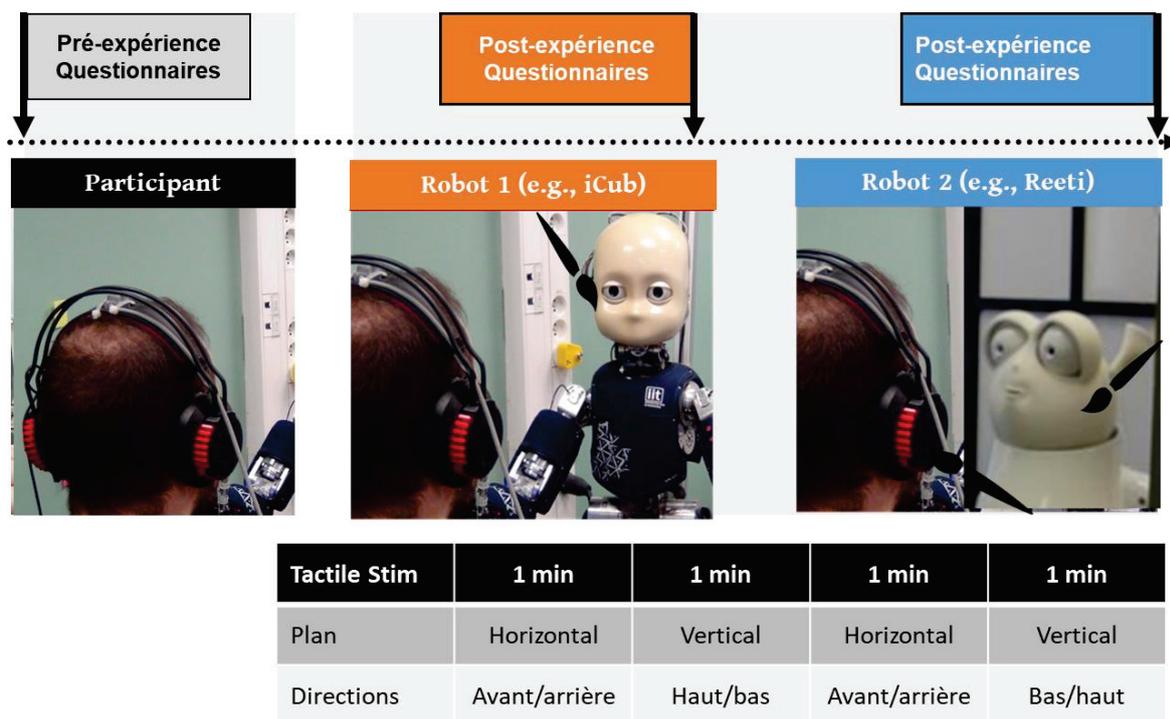
#### 2.1.1. **Participants**

Pour l'expérience FaceVT (SYN vs ASYN), un nouveau groupe de 24 sujets sains, de 26 ans d'âge moyen ( $SD = 4,27$ ), sans déficits ou antécédents neurologiques, psychiatriques ou ORL a participé à l'expérience. Dans cette étude, le choix du nombre de sujets a été établi en regard de l'expérience précédente. Les sujets recrutés parmi le laboratoire étaient naïfs concernant les hypothèses et les objectifs de l'étude. Ils avaient donné leur consentement éclairé avant l'expérience. L'expérience a été, par ailleurs, réalisée en respectant les principes de la dernière version de la déclaration d'Helsinki (*World Medical Association, 2013*).

#### 2.1.2. **Le protocole expérimental**

Dans l'expérience FaceVT (SYN vs. ASYN), dont la configuration est schématisée dans la Figure 4-8, les robots et le paradigme sont les mêmes que dans l'expérience TéléVT (SYN vs. ASYN) à l'exception de la situation d'interaction où participant et robot se font face. Aussi, nous ne rappellerons que les points méthodologiques essentiels et différents dans la suite de cette section.

Comme précédemment, l'expérience se déroule en quatre étapes : la présentation de l'expérience (1), les questionnaires pré-tests (2), les deux sessions d'interaction face-à-face incluant les questionnaires spécifiques après chaque session (3) les questionnaires post-tests (4).



**Figure 4-8 : Configuration expérimentale de l'expérience de téléprésence FaceVT (SY N vs. ASYN) montrant 1) à gauche, le sujet muni d'un casque HMD de réalité virtuelle et d'un casque audio sur lequel est fixé le capteur de mouvement, 2) au centre, le robot humanoïde iCub stimulé sur la joue droite et, 3) à droite, le robot Reeti, stimulé sur la joue gauche, faces à un miroir qui permet au sujet de se voir en tant que robot. En bas, le tableau présente les quatre phases successives de la procédure expérimentale effectuées avec chacun des robots en session synchrone ou asynchrone. Chaque phase correspond à la répétition pendant une durée de 1 minute du mouvement d'une stimulation tactile repéré par sa direction et son sens : haut-bas, bas-haut, gauche-droite, droite-gauche. Lors des expériences, les phases de mouvements horizontaux et verticaux sont alternées selon tous les ordres possibles en les contrebalançant au niveau des sujets.**

Ainsi, après la présentation de l'expérience puis la passation des deux questionnaires pré-test, le sujet est installé face à un robot pendant les deux sessions successives d'interaction avec les deux robots (Face-à-Face Robot 1 (FFR1) et Face-à-Face Robot 2 (FFR2)). L'axe corporel du sujet est aligné sur l'axe médian du robot. Pour chaque sujet, l'expérience consiste en deux sessions expérimentales d'interaction face-à-face, successivement avec chacun des deux robots. Dans chaque session, la séquence de stimulation tactile de la joue du sujet est composée de quatre phases successives des mouvements du pinceau selon deux directions, horizontale et verticale. Selon la position du pinceau sur la joue en début de séquence (déplacement horizontal : avant ou arrière- déplacement vertical : haut ou bas), on distingue 4

séquences. L'ordre des sessions (SYN et ASYN), du type de robot (*Reeti* ou *iCub*), du côté de la joue stimulée (droite ou gauche), et des quatre séquences de stimulation tactile est réparti de manière aléatoire parmi toutes les combinaisons possibles pour chaque sujet (cf. Tableau 4-1).

Après présentation des consignes, la session expérimentale en interaction face-à-face se déroule en quatre phases successives d'une minute de stimulation tactile, comme illustré dans la Figure 4-8. Puis, le sujet est invité à répondre aux différents questionnaires. Il est ensuite à nouveau installé, face au robot, comme dans la première session de stimulation tactile (FFR1). Cette deuxième session en face-à-face (FFR2) se déroule de la même manière que la session décrite précédemment en quatre phases successives, seuls diffèrent la synchronie de la stimulation tactile (SYN/ASYN) et le type de robot.

### 2.1.3. Analyse statistique des réponses aux questionnaires

L'analyse statistique des scores de sympathie, d'inférence des états internes, d'inclusion Soi-Autruï et d'incorporation est menée suivant les facteurs intra-sujet et inter-sujet identifiés à savoir *ROB.Type*, *STIM.État*, *CAT*, et *PREPOST*.

La même approche statistique d'étude de normalité et d'homogénéité des variances de chaque variable a été effectuée. Dans l'expérience décrite ici, la distribution des données répondait aux hypothèses de normalité et d'homogénéité de la variance à  $p > 0,05$ . Des analyses de variances ANOVA et des tests paramétriques statistiques ont été réalisées avec le progiciel STATISTICA pour les scores SYMP, ISA et INC. Lorsqu'un effet principal ou une interaction étaient significatifs après l'analyse de variance, des comparaisons *a posteriori* utilisant le test de Bonferroni ont été effectuées. Pour la variable INC, une procédure Test T pour échantillon unique a été utilisée afin de tester si la moyenne du score INC diffère de la valeur nulle. Pour la variable IEI, les scores IEI ont été corrélés entre les réponses « soi » et « autre » avec un test de Spearman (distribution non gaussienne des variables binaires).

## 2.2. Résultats

### 2.2.1. Hypothèses opérationnelles

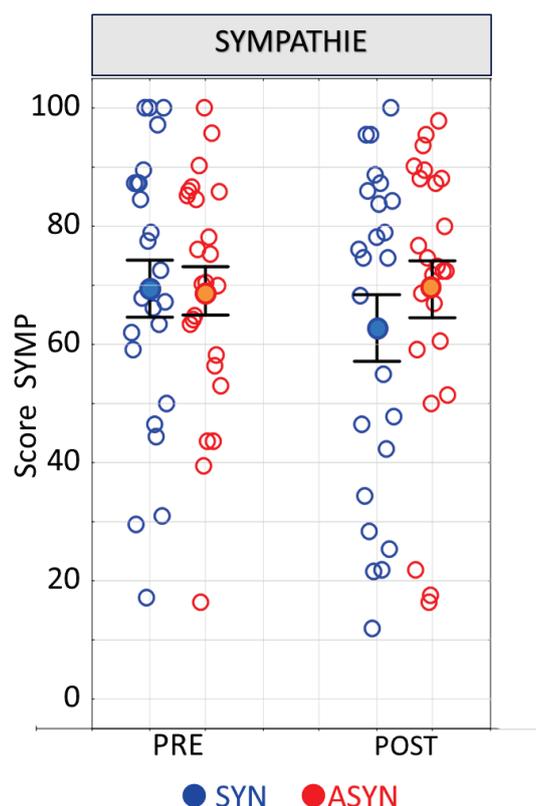
Compte tenu des objectifs et des résultats des expériences issues du même paradigme, nous proposons les hypothèses suivantes pour l'expérience FaceVT :

**Hypothèse 1 :** Lors de manipulations purement sensorielles –des caresses des deux visages sujet et robot–, en face-à-face, nous conjecturons que la sensation d’incorporation diminue comparativement à la situation de téléprésence robotique.

**Hypothèse 2 :** Lors de manipulations visuo-tactiles en face-à-face, nous conjecturons que la temporalité de l’induction n’aura pas d’effet sur les composantes de cognition sociale, comme observé en situation de téléprésence robotique.

### 2.2.2. La variable Sympathie

Comme en expérience TéléVT, nous n’observons pas d’effet significatif sur la variable SYMP de l’état de la stimulation ( $F(1,22) = 0,63, p > 0,25, \eta^2 = 0,0278$ ) et de la situation PREPOST ( $F(1,22) = 1,075, p > 0,25, \eta^2 = 0,47$ ) (Figure 4-9).



**Figure 4-9 :** Représentation graphique de la moyenne des scores SYMP mesurés dans l’expérience FaceVT (SYN vs ASYN) avant (PRE) et après (POST) interaction face-à-face en fonction du facteur État de la stimulation (STIM.État : SYN, ASYN). La moyenne, exprimée en pourcentage, est représentée par un symbole rond plein, et la barre d’erreur par le trait vertical associé (erreur standard).

### 2.2.3. La variable Inclusion Soi-Autruï

En situation expérimentale FaceVT, le score de la variable ISA est indépendant de l'état de la stimulation ( $F(1,22) = 0,03$ ,  $p > 0,25$ ,  $\eta^2 = 0,061$ ), comme observée pour l'expérience TéléVT. Aucun effet n'est observé sur la variable ISA (Figure 4-10).



**Figure 4-10 :** Représentation graphique de la moyenne des scores de la variable Inclusion Soi-Autruï dans l'expérience FaceVT, mesurés après chaque session en interaction face-à-face en fonction du facteur État de la stimulation, synchrone (SYN) vs asynchrone (ASYN). La moyenne est représentée par un symbole rond plein et la barre d'erreur par le trait vertical associé (erreur standard).

### 2.2.4. La variable Incorporation

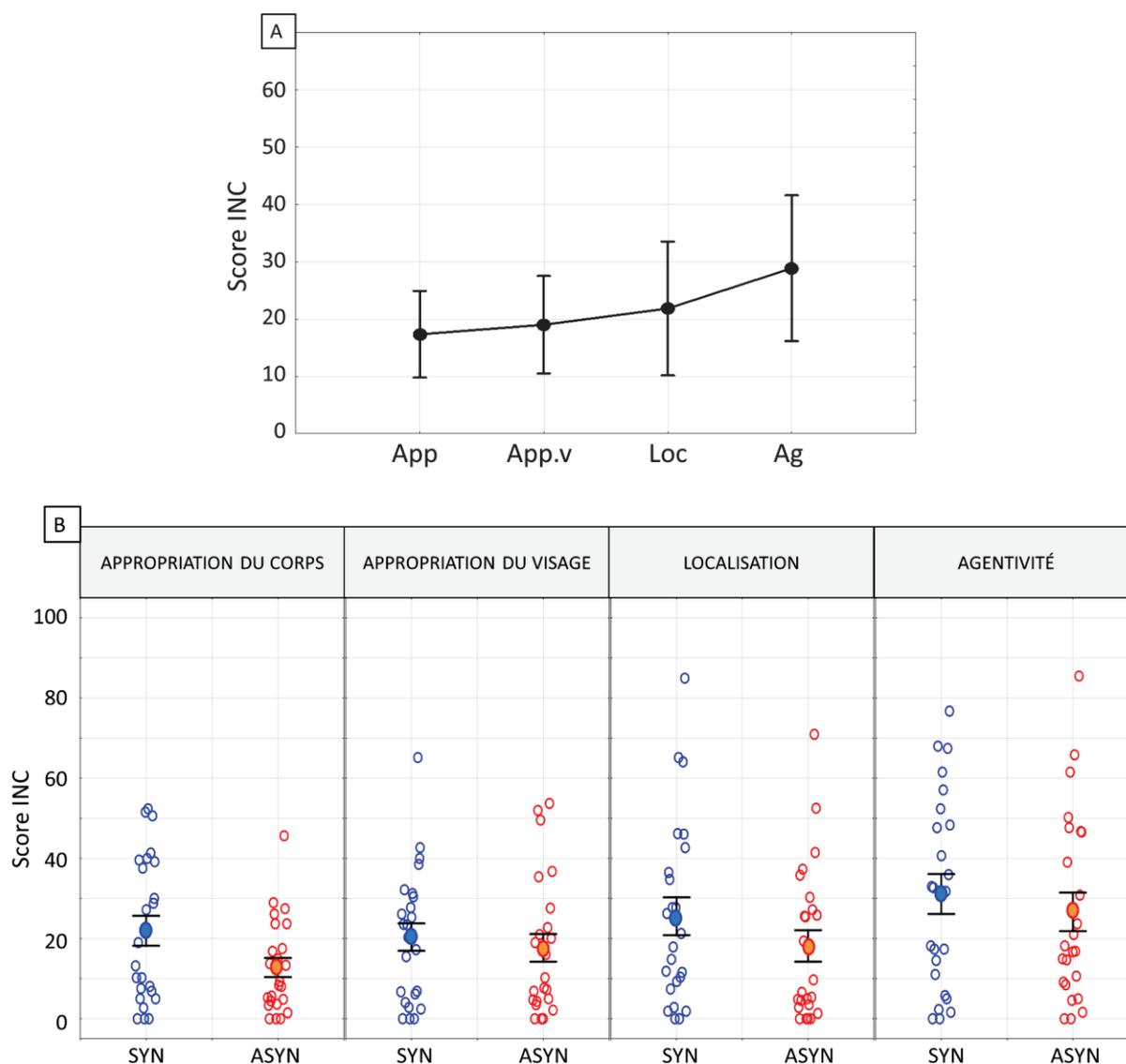
Pour chaque catégorie d'incorporation, le niveau d'incorporation est significativement supérieur à 0 en situation SYN et ASYN (Test T par rapport à la valeur référente qui est 0 :  $p \leq 0,001$ ). Ainsi, il existe toujours une sensation d'incorporation non nulle, ici induite en situation d'interaction face-à-face lors de stimulations tactiles du sujet et du robot, et dans les deux conditions, SYN et ASYN. Les moyennes des scores des différentes catégories d'incorporation obtenues en condition SYN et ASYN sont présentées dans le tableau 4-4.

<i>Catégories d'Incorporation</i>	<b>Moyenne des scores SYN (%)</b>	<b>Moyenne des scores ASYN (%)</b>
<i>App</i>	21,91±9,14	12,76±5,81
<i>App.v</i>	20,35±8,38	17,64±8,46
<i>Loc</i>	25,54±11,56	18,13±8,63
<i>Ag</i>	31,09±12,19	26,63±11,74

**Tableau 4-3 : Moyennes des scores et déviation standard pour les différentes catégories d'incorporation, en conditions SYN et ASYN.**

Comme le montre la Figure 4-11A, le score INC varie significativement en fonction de de la catégorie d'Incorporation (effet principal du facteur *CAT* :  $F(3,66) = 8,72$ ,  $p < 0,001$  ;  $\eta^2 = 0,284$ ,  $\alpha = 0,993$ ), mais il ne dépend pas du type de Robot ( $F(1,22) = 0,06$ ,  $p > 0,25$  ;  $\eta^2 = 0,0003$ ). Le score INC tend à augmenter en situation SYN vs ASYN sans toutefois atteindre le niveau de significativité (*STIM.État* :  $F(1,22) = 3,08$ ,  $p = 0,093$  ;  $\eta^2 = 0,122$ ,  $\alpha = 0,482$ ).

La comparaison des moyennes par le test *post-hoc* de Bonferroni met en évidence que l'effet d'incorporation du sujet dans le robot est significativement augmenté pour une incorporation par Ag comparativement à App ( $p < 0,001$ ), App.v ( $p = 0,0008$ ), et dans une moindre mesure Loc ( $p = 0,031$ ).



**Figure 4-11 :** *A) Effet principal de la catégorie d'incorporation (CAT) sur la variable incorporation dans l'expérience FaceVT. Représentation graphique de la moyenne des scores INC, exprimée en pourcentage, pour chaque catégorie d'incorporation, i.e., Appropriation du corps (App), Appropriation du visage (App.v), Localisation (Loc), Agentivité (Ag). B) Représentation graphique de la moyenne des scores INC, exprimée en pourcentage, en fonction du facteur État de la stimulation STIM.État (SYN vs ASYN) pour chaque catégorie d'incorporation. La moyenne est représentée par un symbole rond plein et la barre d'erreur par le trait vertical associé (erreur standard).*

### 2.2.5. La variable d'Inférence des États Internes

Une analyse statistique à l'aide du test non paramétrique de Spearman a été menée, sujet par sujet. Elle montre que trois des vingt-quatre sujets, soit 12.5 % des sujets, donnent l'effet

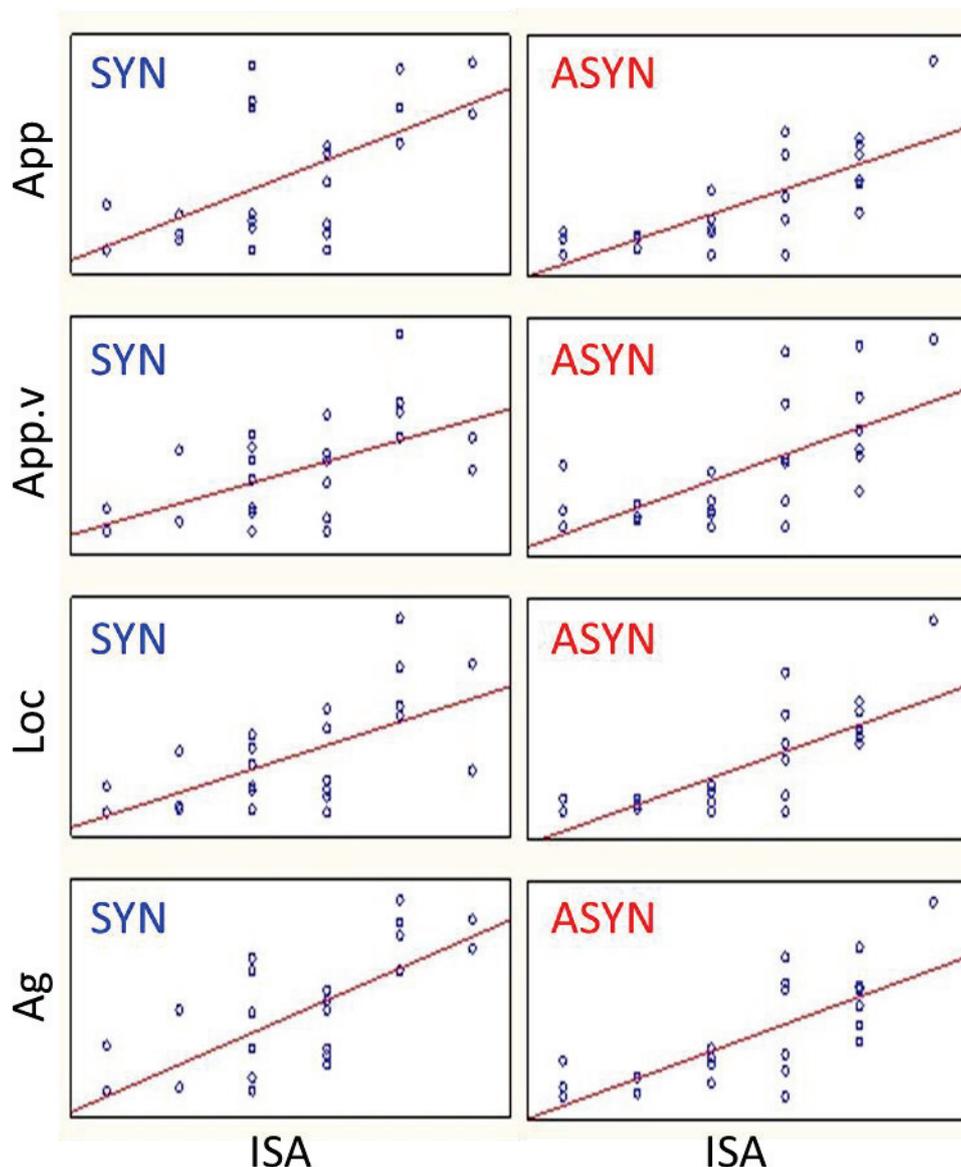
attendu, c'est-à-dire, une corrélation significative des scores Sujet-Robot en condition synchrone uniquement. Ce sont les sujets 14, 20, et 23 :

- Pour le quatorzième sujet, nous observons une corrélation significative entre soi et autre en synchrone ( $R_{\text{spearman}} = 0,514, p = 0,034$ ), et pas de corrélation entre soi et autre en asynchrone ( $R_{\text{spearman}} = 0,271, p > 0,25$ ).
- Pour le vingtième sujet, nous observons une corrélation significative entre soi et autre en synchrone ( $R_{\text{spearman}} = 0,549, p = 0,022$ ), et pas de corrélation entre soi et autre en asynchrone ( $R_{\text{spearman}} = 0,0276, p > 0,25$ ).
- Pour le vingt-troisième sujet, nous observons une corrélation significative entre soi et autre en synchrone ( $R_{\text{spearman}} = 0,833, p < 0,001$ ), et pas de corrélation entre soi et autre en asynchrone ( $R_{\text{spearman}} = 0,159, p > 0,25$ ).

Dans l'analyse question par question, aucune question ne donne le résultat attendu.

#### 2.2.6. Résultats de l'analyse des corrélations entre les variables d'incorporation et de cognition sociale

L'analyse des corrélations, entre les variables d'incorporation selon la catégorie et les composantes de cognition sociale mesurées en condition synchrone, a révélée de nombreuses corrélations significatives entre ces variables. Les diagrammes de corrélation arborent plusieurs corrélations positives au seuil de significativité  $p = 0,0125$  (correction de Bonferroni lors de comparaisons multiples), comme illustré sur la Figure 4-12. De force modérée à forte, soulignons cependant que ces corrélations mettent en évidence, comme en situation de téléprésence et en modalité tactile asynchrone, que seule l'affinité est corrélée avec les quatre catégories d'incorporation, l'appropriation du corps, l'appropriation des traits du visage, la localisation et l'agentivité :  $INC_{\text{App}}$  et ISA ( $r = 0,598, p = 0,002$ ),  $INC_{\text{App}}$  et ISA ( $r = 0,578, p = 0,003$ ),  $INC_{\text{Loc}}$  et ISA ( $r = 0,522, p = 0,001$ ),  $INC_{\text{Ag}}$  et ISA ( $r = 0,719, p < 0,001$ ).



*Figure 4-12 : Corrélations positives en conditions synchrone et asynchrone entre les variables d'incorporation selon les quatre catégories et la variable de cognition sociale ISA, tracées à partir des données de l'expérience FaceVT. Les droites de régression, tracées en rouge, correspondent aux corrélations significatives de Pearson au seuil de significativité de 0,0125.*

En condition asynchrone, les diagrammes de corrélation arborent les mêmes corrélations positives au seuil de significativité  $p = 0,0125$  mais de force plus importante, comme illustré sur la Figure 4-12 : Seule l'affinité est corrélée avec les quatre catégories d'incorporation, l'appropriation du corps, l'appropriation des traits du visage, la sensation de délocalisation et la sensation d'agentivité :  $INC_{App}$  et ISA ( $r = 0,742$ ,  $p < 0,001$ ),  $INC_{App}$  et ISA ( $r = 0,646$ ,  $p < 0,001$ ),  $INC_{Loc}$  et ISA ( $r = 0,751$ ,  $p < 0,001$ ),  $INC_{Ag}$  et ISA ( $r = 0,735$ ,  $p < 0,001$ ).

### 2.2.7. Synthèse des résultats de l'expérience FaceVT (Synchrone vs. Asynchrone)

En situation d'interaction face-à-face sujet-robot, la stimulation tactile induit toujours une sensation d'incorporation non nulle. Cependant, l'effet de la synchronisation temporelle de la stimulation tactile entre le sujet et le robot n'apparaît plus de manière significative même si les scores d'incorporation restent plus élevés en condition synchrone qu'en condition asynchrone. Ainsi, cela semble confirmer ce qui avait été observé en situation motrice, à savoir que le miroir semble être un vecteur d'information cognitive implicite du soi qui renforce la sensation d'incorporation. Par ailleurs, dans cette situation expérimentale de face-à-face, aucun effet significatif n'est observé sur les composantes de cognition sociale, sympathie et affinité du sujet vis-à-vis du robot. Cependant, il est à noter que l'affinité du sujet vis-à-vis du robot est toujours assez fortement corrélée à une plus grande incorporation dans le robot, quelle que soit la synchronie de la stimulation tactile.

En condition visuo-tactile, on peut conclure que la sensation d'incorporation du sujet dans le robot est présente, à des niveaux d'intensité variables, mais quelles que soient la synchronie de la stimulation tactile et la situation d'interaction homme-robot. Cependant, des stimulations tactiles synchrones du robot et du participant augmentent la sensation d'incorporation, mais seulement en situation de téléprésence. Soulignons qu'en situation de téléprésence également, la stimulation tactile renforce la sensation d'incorporation de manière plus distribuée qu'en situation motrice, et ceci, à travers les sensations d'appropriation corporelle, de délocalisation, d'agentivité, et dans une moindre mesure d'appropriation des traits du visage. Du point de vue de la cognition sociale, la synchronie des stimulations tactiles du sujet et du robot n'induit pas de différences significatives sur les composantes de cognition sociale, quel que soit le type d'interaction homme-robot auquel les participants sont confrontés. De manière différente à la modalité visuo-motrice, soulignons la présence de corrélations positives entre l'affinité uniquement et les différentes catégories d'incorporation en situation de téléprésence et de face-à-face, ces corrélations étant plus fortes et plus nombreuses lorsque la stimulation tactile est délivrée de manière asynchrone.

### 2.3. Tableau de synthèse des résultats expérimentaux

Prises chacune individuellement, ces expériences ont mis en évidence des effets significatifs sur la sensation d'incorporation et les composantes de cognition sociale de sympathie et d'identification Soi-Autruï selon la temporalité de la synchronie. L'ensemble des résultats des analyses statistiques des expériences visuo-motrices et visuo-tactiles présentées précédemment est résumé dans le tableau 4-5.

<b>A</b>	Synchrone vs Asynchrone	Téléprésence		Face à Face	
		Visuo-moteur	Visuo-tactile	Visuo-moteur	Visuo-tactile
	Sympathie	> ***	=	≥ (p=0,08)	=
	Inclusion Soi-Autruï	> ***	=	> *	=
	Incorporation	> ***	> ***	> ***	≥ (p=0,09)
▪	Appropriation du corps	-	> **	-	=
▪	Appropriation du visage	=	=	=	=
▪	Localisation	=	> ***	=	=
▪	Agentivité	> ***	> **	> ***	=

<b>B</b>	PRE-expérience vs POST-expérience	Téléprésence		Face à Face	
		Visuo-moteur	Visuo-tactile	Visuo-moteur	Visuo-tactile
	Sympathie	> ***	=	=	=

**Tableau 4-4 : A) Synthèse des effets de la synchronie observés dans chacune des expériences TéléVM, FaceVM, TéléVT et FaceVT sur les variables Sympathie, Inclusion Soi-Autruï, Incorporation et les catégories d'incorporation, Appropriation du corps, Appropriation des traits du visage, Localisation de soi, et Agentivité. Notons que l'expérience TéléVM(SYN/STA) diffère de TéléVM(SYN/ASYN) notamment pour la sensation de délocalisation dans le robot qui est plus élevée en condition synchrone comparativement à la condition statique ( $p > **$ ). B) Synthèse des effets du facteur PREPOST observés dans chacune des expériences TéléVM, FaceVM, TéléVT et FaceVT sur la variable SYMP. L'effet sur la variable SYMP en TéléVM (SYN/ASYN) est aussi observé en TéléVM (SYN/STA) ( $p > ***$ ).**

En résumé, lorsque le sujet se voit en tant que robot, des mouvements de tête synchrones entre le robot et le participant augmentent significativement la sensation d'incorporation essentiellement à travers la sensation de contrôler les mouvements du robot, alors que des stimulations tactiles synchrones des deux visages augmentent de manière non différenciée les sentiments d'agentivité, de délocalisation et d'appartenance du corps. Seule la sensation d'appropriation des traits du visage, toujours d'une intensité inférieure aux autres sensations, reste peu ou non dépendante de l'information temporelle, synchrone et asynchrone, quelles que soient les autres modalités (Tableau 4-5A).

Concernant les composantes de cognition sociale, c'est uniquement en téléprésence robotique et modalité visuo-motrice qu'un renforcement du sentiment de sympathie envers le robot est observé après l'expérience d'interaction (Tableau 4-5B). Dans ces mêmes conditions de téléprésence robotique et modalité visuo-motrice, la temporalité joue un rôle important, le robot étant ressenti moins sympathique en condition asynchrone comparativement à la condition synchrone. Du point de vue de l'affinité du sujet envers le robot, les deux robots sont ressentis plus proches en modalité visuo-motrice synchrone, et principalement en téléprésence robotique mais aussi en face-à-face.

## Chapitre 5 : Comparaisons inter-expérience

La démarche expérimentale de ce travail pourrait se définir comme une seule et même expérience d'interaction homme-robot, selon deux temporalités, synchrone et asynchrone, menée en quatre temps, explorant tour à tour, deux modes d'induction différents (visuo-moteur et visuo-tactile) et selon deux perspectives d'interaction homme/robot (téléprésence et interaction face-à-face). Ainsi, à partir d'une analyse statistique de l'ensemble des données expérimentales, nous pouvons questionner l'influence du mode d'induction, moteur ou tactile, sur la représentation de soi et la cognition sociale du sujet, indépendamment de la perspective d'interaction homme-robot. Inversement, nous pouvons nous interroger sur l'influence de la perspective d'interaction homme-robot, en téléprésence robotique ou en face-à-face, indépendamment du mode d'induction expérimental. Dans ce chapitre, une analyse statistique sur les variables d'incorporation et de cognition sociale sera présentée, en comparant notamment les effets de la perspective (téléprésence vs face-à-face), du mode d'induction (sensorimoteur vs sensoriel pure), et de leur interaction.

### 1. Analyse statistique des données

Les variables analysées sont la sympathie (SYMP), l'affinité (ISA) et l'incorporation (INC). Des analyses de variance mixtes à mesures répétées ont été réalisées. Ces analyses ont permis de comparer les différentes situations expérimentales. Nous avons étudié les effets d'interaction entre les différents facteurs suivants : l'état de synchronie à deux modalités, synchrone et asynchrone ; la catégorie d'incorporation à trois modalités, appropriation du visage, localisation et agentivité ; le mode d'induction de l'incorporation à deux modalités, visuo-moteur et visuo-tactile ; la perspective expérimentale selon deux modalités, téléprésence et face-à-face. Le tableau 5-1 résume les caractéristiques des différents facteurs, leur type inter- ou intra-sujet et inter- ou intra-expérience, leurs modalités, et les variables concernées. Pour l'analyse statistique de la variable incorporation, le sentiment d'appartenance App n'étant questionné qu'en expérience visuo-tactile, seules les catégories d'incorporation App.v, Loc, et Ag ont été considérées dans l'analyse.

Concernant la variable SYMP, cette analyse statistique a été menée en situation post-expérience. Nous avons effectué une ANOVA à mesures répétées selon les trois facteurs, *Syn.État*, *Exp.Mod.*, et *Exp.Pers* pour les composantes de cognition sociales SYMP et ISA. Pour la variable INC, nous avons effectué une ANOVA à mesures répétées selon les quatre facteurs, *CAT*, *Syn.État*, *Exp.Mod.*, et *Exp.Pers*. Lorsqu'un effet d'interaction significatif était observé, des comparaisons *a posteriori* utilisant le test de Bonferroni ont été effectuées.

<b>Nom</b>	<b>Abréviation</b>	<b>Variable concernée</b>	<b>Type de facteur</b>	<b>Modalités</b>
<i>État de synchronie</i>	<i>Syn. État</i>	Toutes	intra-sujet intra-expérience	Synchrone (SYN) Asynchrone (ASYN)
<i>Catégorie d'incorporation</i>	<i>CAT</i>	Incorporation	intra-sujet intra-expérience	Appropriation du visage (App.v) Localisation (Loc), Agentivité (Ag)
<i>Mode expérimental</i>	<i>Exp.Mod.</i>	Toutes	inter-sujet inter-expérience	Visuo-moteur vs (VM) Visuo-tactile (VT)
<i>Perspective expérimentale</i>	<i>Exp.Pers</i>	Toutes	inter-sujet inter-expérience	Téléprésence (Télé) Face-à-face (Face)

**Tableau 5-1 : Terminologie des facteurs identifiés pour l'analyse statistique inter-expérience.** Pour chaque facteur sont précisés le type inter- ou intra-sujet et inter- ou intra-expérience, les modalités, et les variables concernées.

## 2. Résultats de l'analyse statistique

Les résultats de l'analyse statistique inter-expérience sont présentés successivement pour la variable INC puis pour les variables SYMP et ISA. L'axe d'analyse a pour objectif de mettre en évidence des effets éventuels d'interaction entre les facteurs état de synchronie, perspective expérimentale (Télé vs Face), et mode d'induction multisensoriel (visuo-moteur vs visuo-tactile).

Sur la base des hypothèses opérationnelles définies pour chacune des quatre expériences, cette analyse de variance inter-expérience a été conduite selon les deux hypothèses suivantes :

**Hypothèse 1 :** Une première hypothèse selon laquelle le sentiment d'incorporation est significativement plus fort en situation de téléprésence qu'en situation face-à-face.

**Hypothèse 2 :** Une seconde hypothèse selon laquelle la sensation d'agentivité est significativement plus forte en modalité visuo-motrice qu'en modalité visuo-tactile.

## 2.1. *La variable Incorporation*

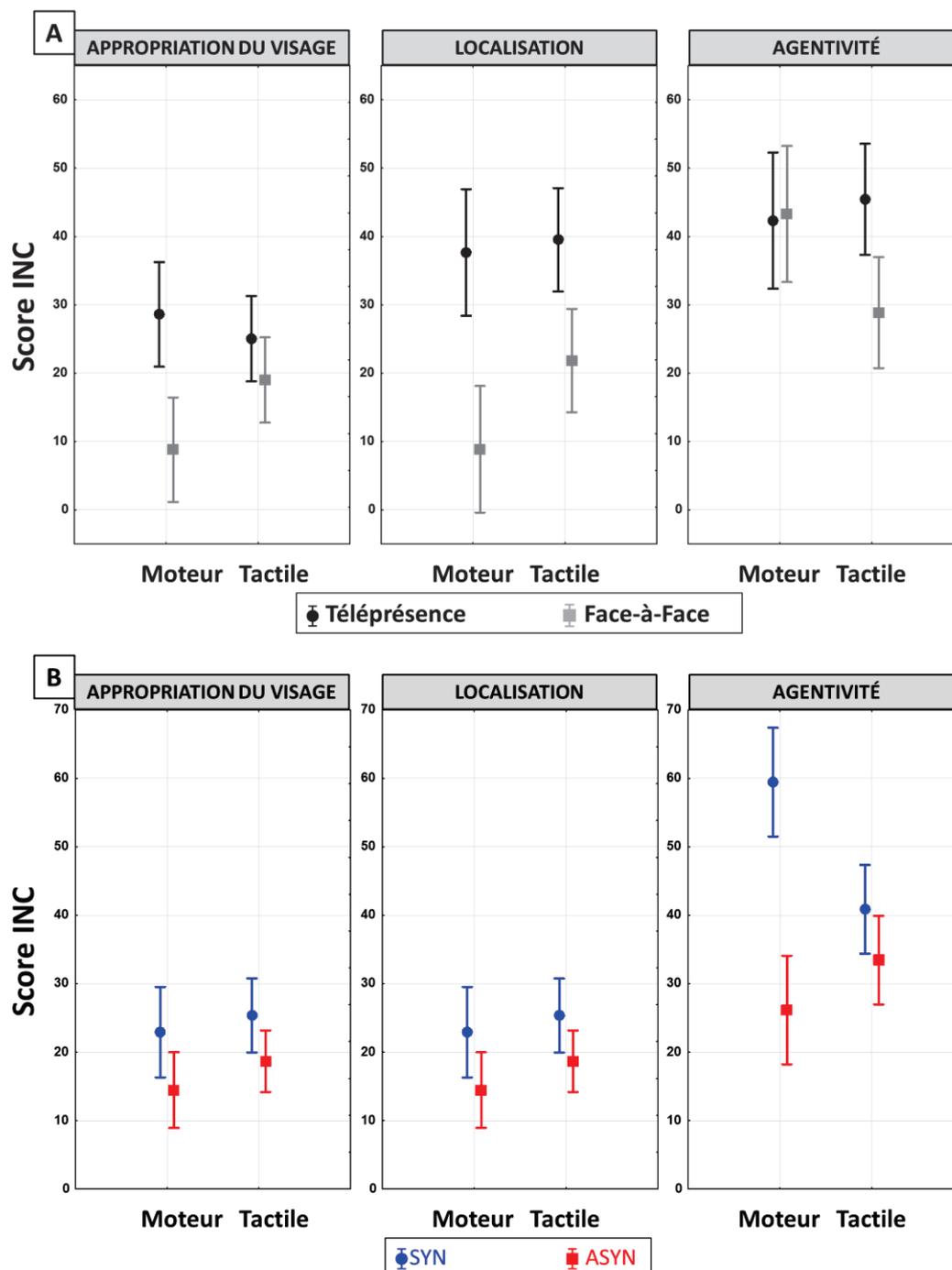
Comme l'illustre la Figure 5-1A, la moyenne des scores d'incorporation dans le robot dépend significativement de la perspective expérimentale (effet principal de *Exp.Pers*  $F(1,72) = 16,90$ ,  $p < 0,001$ ,  $\eta^2 = 0,190$ ,  $\alpha = 0,982$ ) en lien avec la catégorie d'incorporation (Interaction *CAT x Exp.Pers* :  $F(1,72) = 9,33$ ,  $p < 0,001$ ,  $\eta^2 = 0,115$ ,  $\alpha = 0,976$ ). Un renforcement significatif de la sensation de délocalisation du sujet dans le robot ( $p < 0,001$ ) et une tendance croissante de la sensation de ressemblance du visage à celui du robot ( $p = 0,076$ ) sont observés en situation de téléprésence, comparativement à la situation de face-à-face. Par contre, la sensation de contrôle du mouvement du robot ne dépend pas de la perspective expérimentale.

Bien que la sensation d'incorporation dans le robot ne dépende pas du mode expérimental d'induction, visuo-moteur vs. visuo-tactile, ( $F(1,72) = 0,22$ ,  $p > 0,25$ ,  $\eta^2 = 0,003$ ), le score INC varie de manière significativement différente selon la catégorie considérée et le mode d'induction (Interaction *Exp.Mod x CAT* :  $F(1,72) = 6,81$ ,  $p = 0,0014$ ,  $\eta^2 = 0,086$ ,  $\alpha = 0,915$ ). En mode expérimental visuo-moteur, les moyennes des scores App.v ( $p < 0,001$ ) et Loc ( $p < 0,001$ ) sont significativement réduites comparativement à Ag, et en mode visuo-tactile, la moyenne du score App.v est significativement réduite comparativement à Ag ( $p < 0,001$ ) et Loc ( $p = 0,0034$ ).

Un effet d'interaction significatif sur la variable INC entre les facteurs Perspective Expérimentale, Mode d'induction Expérimental et Catégorie d'Incorporation (interaction *CAT x Exp.Pers x Exp.Mod* :  $F(2,144) = 11,34$ ,  $p < 0,001$ ,  $\eta^2 = 0,136$ ,  $\alpha = 0,992$ ) est observé, comme illustré dans la Figure 5-1A. La comparaison des moyennes issue du test *post-hoc* de Bonferroni montre, qu'en modalité visuo-motrice, la moyenne du score Loc est significativement plus élevée en téléprésence qu'en face-à-face ( $p = 0,001$ ). Ceci n'est pas observé en modalité visuo-tactile ; une tendance similaire est toutefois présente ( $p = 0,062$ ). Aucun autre effet significatif n'est observé lors de la comparaison deux à deux des scores visuo-moteur vs. visuo-tactile et selon la perspective expérimentale, en téléprésence et en face-à-face.

De manière intéressante, l'effet de la synchronie sur le score INC varie significativement en fonction de la modalité sensorielle ou motrice de l'induction (Interaction *Exp.Mod x SYN* :  $F(1,72) = 7,0$ ,  $p < 0,01$ ,  $\eta^2 = 0,089$ ,  $\alpha = 0,742$ ) en lien avec la catégorie considérée (Interaction *Exp.Mod x SYN x CAT* :  $F(2,144) = 22,08$ ,  $p < 0,001$ ,  $\eta^2 = 0,235$ ,  $\alpha = 0,999$ ) (Figure 5-1B). La comparaison *post-hoc* de Bonferroni montre que cet effet de synchronie est principalement dû aux différents scores d'agentivité obtenus en modalité visuo-motrice, comparativement à la modalité visuo-tactile : la moyenne du score d'agentivité en condition visuo-motrice synchrone

est significativement plus élevée comparativement à la condition visuo-tactile asynchrone ( $p < 0,001$ ) et elle est tendanciellement supérieure comparativement à la condition visuo-tactile synchrone ( $p = 0,064$ ).



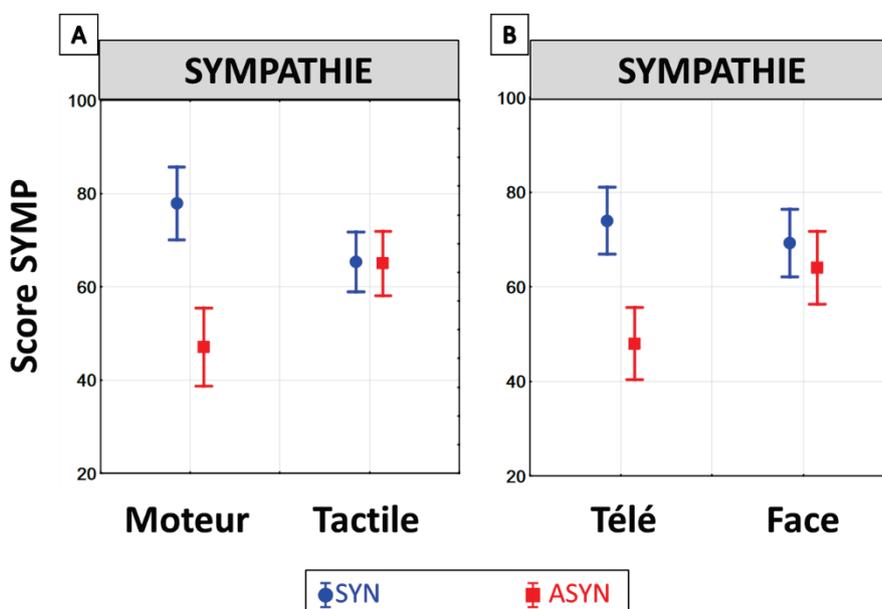
**Figure 5-1: Effets d'interaction relatifs au mode d'induction et à la catégorie d'incorporation.** Représentation graphique de la moyenne des scores de chaque catégorie d'incorporation. **A) En fonction du facteur Perspective expérimentale et en fonction du facteur Mode d'induction.** **B) En fonction du facteur État de Synchronie et du facteur Mode d'induction.** La moyenne, exprimée en pourcentage, est représentée par un symbole, rond ou carré et la barre d'erreur par le trait vertical associé (écart type).

## 2.2. Les composantes de cognition sociale

Les composantes de cognition sociale ont été fortement influencées par l'interaction de la synchronie avec les modalités d'induction, motrice ou sensorielle, et les modalités de perspective expérimentale, téléprésence ou face-à-face.

### 2.2.1. La variable Sympathie

L'effet de la synchronie sur la moyenne des scores de sympathie est significativement dépendant de la perspective expérimentale Télé/Face (Interaction *Syn.État* x *Exp.Pers* :  $F(1,76) = 6,96$ ,  $p = 0,01$ ,  $\eta^2 = 0,08$ ,  $\alpha = 0,740$ ) et de la modalité d'induction Moteur/Tactile (Interaction *Syn.État* x *Exp.Mod* ( $F(1,76) = 15,01$ ,  $p < 0,001$ ,  $\eta^2 = 0,16$ ,  $\alpha = 0,969$ ), comme illustré dans la Figure 5-2.



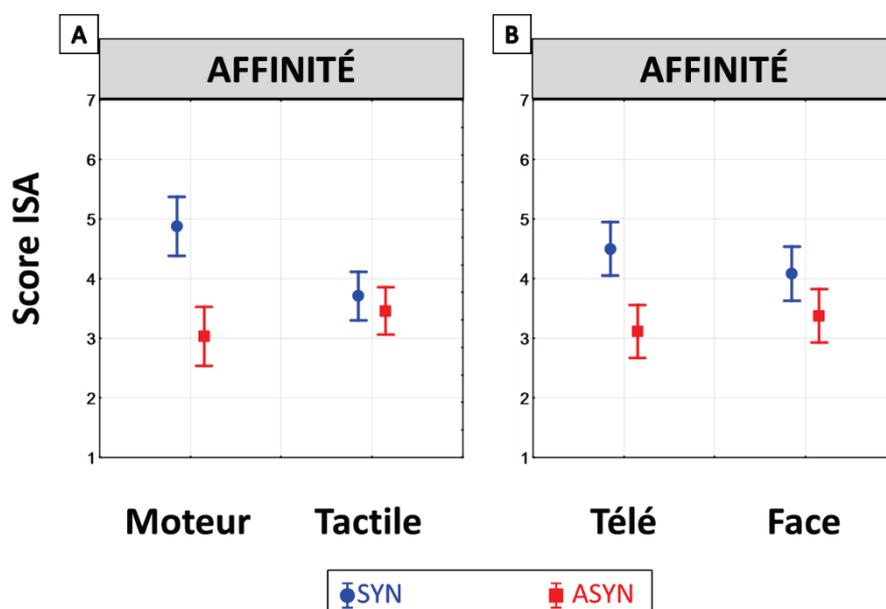
**Figure 5-2 : Effets d'interaction relatifs à l'état de synchronie du robot pour la variable Sympathie** Représentation graphique de la moyenne des scores de la variable Sympathie (SYMP) mesurés lors des 4 expériences TéléVM, TéléVT, FaceVM et FaceVT en situation post-expérience **A) En fonction du facteur État de Synchronie, SYN (en bleu) et ASYN (en rouge), et du facteur Mode Expérimental, Moteur vs. Tactile. B) En fonction du facteur État de Synchronie, SYN vs. ASYN et du facteur Perspective Expérimentale, Télé vs. Face.** La moyenne, exprimée en pourcentage, est représentée par un symbole, rond ou carré, et la barre d'erreur par le trait vertical associé (écart type).

De manière intéressante, la comparaison *post-hoc* de Bonferroni montre que l'effet de la perspective expérimentale relève d'une baisse significative du score SYMP en condition de

téléprésence asynchrone par rapport à la condition face-à-face asynchrone ( $p = 0,005$ ) et face-à-face synchrone ( $p = 0,005$ ). Similairement, l'effet de la modalité est lié à une baisse significative du score SYMP, avec la modalité visuo-motrice asynchrone par rapport à la modalité visuo-tactile asynchrone ( $p = 0,005$ ) et la modalité visuo-tactile synchrone ( $p = 0,004$ ).

### 2.2.2. La variable Interaction Soi-Autre

L'effet de la synchronie sur la moyenne des scores ISA est significativement dépendant de la modalité d'induction Moteur/Tactile (Interaction  $Exp.Mod \times Syn.État : F(1,72) = 19,44$ ,  $p < 0,001$ ,  $\eta^2 = 0,21$ ,  $\alpha = 0,991$ )), comme illustré dans la Figure 5-3. Une tendance est aussi observée selon la modalité de la perspective expérimentale Télé/Face (Interaction  $Exp.Pers \times Syn.État : F(1,72) = 3,5$ ,  $p = 0,065$ ,  $\eta^2 = 0,046$ ,  $\alpha = 0,456$ ) (Figure 5-3). La comparaison *post-hoc* de Bonferroni montre que l'effet du mode expérimental d'induction relève d'une augmentation de la moyenne du score ISA en mode visuo-moteur synchrone, significativement plus élevée par rapport au mode visuo-tactile synchrone ( $p = 0,002$ ) et asynchrone ( $p < 0,001$ ).



**Figure 5-3 : Effets d'interaction relatifs à l'état de synchronie du robot pour la variable Interaction Soi-Autre.** Représentation graphique de la moyenne des scores de la variable Inclusion Soi-Autruï mesurés lors des 4 expériences TéléVM, TéléVT, FaceVM et FaceVT. A) En fonction du facteur État de Synchronie; SYN (en bleu) et ASYN (en rouge) et du facteur Mode Expérimental, VM vs. VT. B) En fonction du facteur État de Synchronie, SYN vs. ASYN, et du facteur Perspective Expérimentale, Télé vs. Face. La moyenne est représentée par un symbole, rond ou carré, et la barre d'erreur par le trait vertical associé (écart-type).

### 3. Synthèse des résultats

Différentes modalités multisensorielles et perspectives d'interaction homme-robot ont été mises en place pour étudier, sous différents angles, l'incorporation dans un robot et son influence éventuelle sur la cognition sociale des participants. Les principaux effets issus de l'analyse statistique inter-expérience sont présentés dans le tableau 5-2.

Indépendamment de la perspective expérimentale, du point de vue du mode expérimental d'induction, la force de la sensation d'incorporation ne dépend pas de la modalité visuo-motrice vs visuo-tactile. Cependant, l'effet des catégories sur l'incorporation dépend de la perspective en téléprésence vs face-à-face et de la modalité motrice vs tactile, notamment pour les catégories d'appropriation des traits du visage et de localisation qui apparaissent plus élevées en téléprésence vs face à face uniquement lors de la situation d'induction visuo-motrice.

	Modalité	Perspective	Synchronie Modalité	Synchronie perspective	Catégorie Perspective	Synchronie Modalité Catégorie
<b>Sympathie</b>	ns	ns	***	**	-	-
<b>Interaction Soi-Autre</b>	ns	ns	***	P=0,06	-	-
<b>Incorporation</b>	ns	***	**	ns	P=0,06 Appropriation du visage  *** Localisation	*** Agentivité

**Tableau 5-2 : Les effets significatifs et tendances issus de l'analyse statistique inter-expérience (Modalité : visuo-moteur vs visuo-tactile ; perspective : Télé vs Face ; Synchronie : Synchronie vs Asynchrone ; Catégorie : App.v, Loc, Ag).**

La sensation d'incorporation au sein d'un robot paraît multiforme et diffère selon la manipulation multimodale employée : les sentiments illusoire d'appartenance, de localisation, et d'agentivité sont tous impactés lors de manipulations sensorielles tactiles alors que l'agentivité l'est de manière singulière lors de manipulations motrices utilisant le même paradigme.

La temporalité synchrone ou asynchrone de l'induction agit différemment sur les composantes du sentiment d'incorporation selon les modalités sensorielle ou motrice. L'effet de la synchronie sur le sentiment d'incorporation dépend de la catégorie et de la modalité avec

un effet prédominant de la synchronie sur l'agentivité en situation sensori-motrice. C'est le sentiment de contrôler les mouvements du robot qui est renforcé par des mouvements de tête synchrones comparativement à des stimulations tactiles du visage asynchrone et synchrone.

Les marqueurs de la cognition sociale que sont la sympathie et l'affinité/proximité du sujet envers le robot sont aussi influencés par les différentes modalités d'induction et la perspective expérimentale. Ces sentiments sociaux sont significativement modifiés par le caractère synchrone ou asynchrone d'une stimulation visuo-motrice selon un pattern similaire aux sensations d'incorporation notamment l'agentivité, ce qui n'est pas observé lorsqu'il s'agit d'une stimulation visuo-tactile du visage. De manière intéressante, en situation de téléprésence, les effets de synchronie sur la sympathie du sujet envers le robot sont significativement plus importants qu'en situation de face à face.

## Chapitre 6 : Expérience Espaces-Pointage

En comparaison des expériences précédentes, la mesure des variations de l'espace péri-personnel en situation de téléprésence nous offre une mesure objective des capacités d'incorporation robotique. Après une description du protocole expérimental incluant le matériel et les méthodes, l'analyse des données et les résultats préliminaires seront présentés. En raison du contexte COVID-19, l'expérience initialement programmée a été en partie réalisée et seuls les résultats préliminaires sur 6 sujets seront présentés dans cette thèse.

Cette expérience espaces-pointage comporte trois tâches qui interviennent à différents moments du protocole : 1) une tâche de bisection d'avant-bras dans laquelle il est demandé au participant, ayant les yeux bandés, de pointer avec son index gauche le point qu'il estime comme étant le milieu de son avant-bras droit, en début et fin d'expérimentation, 2) en situation de téléprésence robotique avec le robot *iCub*, une tâche de mesure de l'espace péri-personnel, avant et après une tâche de pointage, 3) en situation de téléprésence avec le robot *iCub*, la tâche de pointage.

L'objectif est d'étudier, d'une part, la modification éventuelle du schéma corporel associé à l'avant-bras du sujet après une tâche de pointage en situation de téléprésence, et d'autre part, la perception quantitative de l'espace péri-personnel en situation de téléprésence robotique à travers une tâche d'estimation de l'espace atteignable du sujet, avant et après la tâche de pointage. Une mesure subjective des capacités d'incorporation d'appartenance, de localisation, et d'agentivité au sein du robot est alors effectuée en fin d'expérimentation, à l'aide d'un questionnaire adapté à la situation expérimentale. Trois modalités expérimentales, basées sur ce même paradigme, seront expérimentées. Dans la première expérience réalisée ici, le sujet est en situation de téléprésence robotique et ainsi voit à travers les yeux du robot. Il a pour consigne de réaliser des mouvements de pointage en tant que robot et voit sa main en tant que main robotique pointer des cubes disposés sur un échiquier.

## 1. Objectif et hypothèses

Nous nous proposons pour cette expérience de tester deux hypothèses :

***Hypothèse 1 :** Une première hypothèse selon laquelle l'étendue de l'espace atteignable ou espace péripersonnel (EPP) du sujet sera sous-estimée après une tâche de pointage réalisée en situation de téléprésence au sein du robot humanoïde iCub, dont les bras et avant-bras sont de dimensions réduites comparativement au sujet adulte humain.*

***Hypothèse 2 :** Une seconde hypothèse concerne la représentation interne du corps qui est étudiée par mesure de la position estimée du milieu de l'avant-bras comme indicateur de cette représentation. Nous proposons ainsi que l'avant-bras étant perçu raccourci, ce point, milieu de l'avant-bras, sera estimé par le sujet comme étant plus proche du coude après la session de pointage en téléprésence.*

## 2. Matériel et méthodes

### 2.1. *Participants*

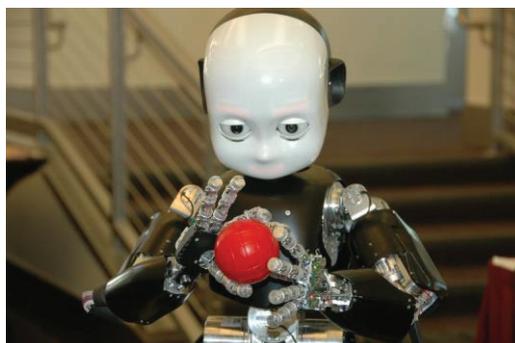
Pour cette expérience ont été testés 6 participants sains, droitiers, entre 18 et 40 ans sans déficits ou antécédents neurologiques, psychiatriques ou ORL. Le choix du nombre de participants a été établi en regard de la situation COVID-19, qui ne permet pas de recruter de participants en dehors du laboratoire et l'impossibilité de programmer des passations dans les temps impartis. Ainsi, tous les participants des personnels (doctorants, post-doctorants ou enseignants-chercheurs) du laboratoire INSERM U1093 CAPS (Cognition, Action, Plasticité & Sensorimotricité) sont naïfs concernant les hypothèses et les objectifs de l'étude. Tous ces participants ont, au préalable, signé en deux exemplaires un formulaire de consentement éclairé avant le début de leur passation expérimentale.

### 2.2. *Description du matériel*

#### 2.2.1. **Matériel nécessaire à la mise en situation de téléprésence**

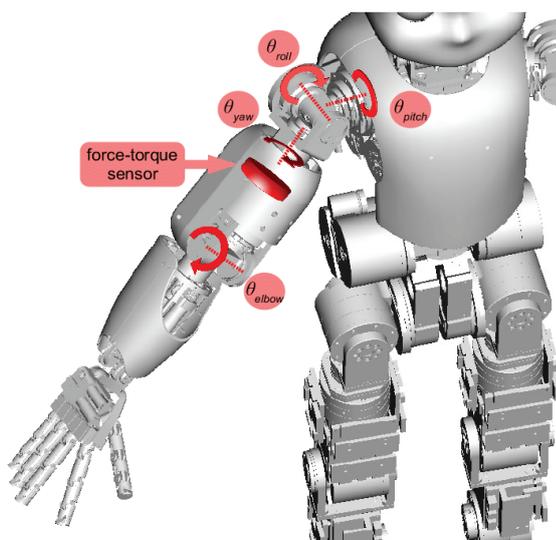
Les deux tâches en situation de téléprésence s'effectuent avec le robot *iCub*, présenté au chapitre 2. Composé de nombreux degrés de liberté actionnés, répartis au niveau du torse, de la tête, des jambes, des bras et des mains, et doté d'un ensemble de capteurs permettant des

applications avancées en interaction avec l'environnement, le robot *iCub* (Figure 6-1) est ici programmé pour des tâches de jugement perceptif d'atteignabilité et de préhension, chaque bras étant doté de 7 degrés de liberté et chaque main de 9 degrés de liberté (Parmiggiani *et al.*, 2012).



**Figure 6-1 : Le robot *iCub* en action.**

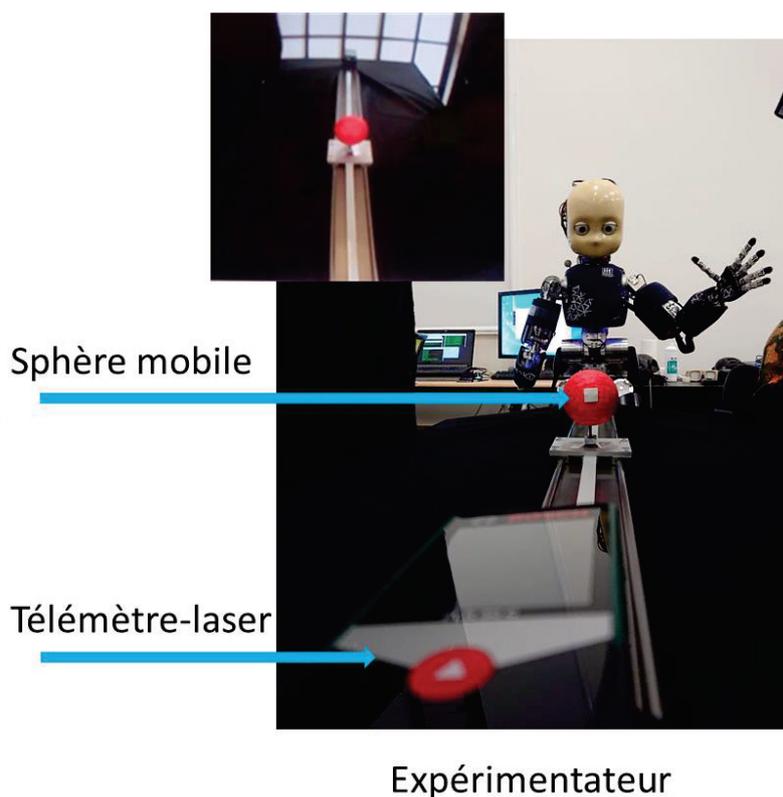
Pour cette expérience, le robot *iCub* a été programmé pour pouvoir atteindre des objets en effectuant des mouvements avec son bras, tout en gardant les objets dans son champ de vision grâce à un suivi de la tête. Une vue schématique du bras, de l'avant-bras et de la main robotisés de longueur 22 cm, 16 cm, et 5 cm, respectivement, est reportée dans la Figure 6-2 (Parmiggiani *et al.*, 2009 ; <http://wiki.icub.org/wiki/>). Comme dans les expériences précédentes, la mise en situation de téléprésence s'effectue via un casque de réalité virtuelle Sony HMD (*Head Mounted Display*) avec affichage stéréo 3D relié aux caméras insérées dans les yeux du robot.



**Figure 6-2 : Vue schématique du bras et de la main du robot *iCub* (Parmiggiani *et al.*, 2012). Compte tenu des longueurs du bras, de l'avant-bras, et de la main, la longueur totale du bras, i.e. la distance entre l'épaule et le bout des doigts du robot, est de 41 cm.**

### 2.2.2. Matériel nécessaire à la tâche d'évaluation de l'espace péripersonnel du participant

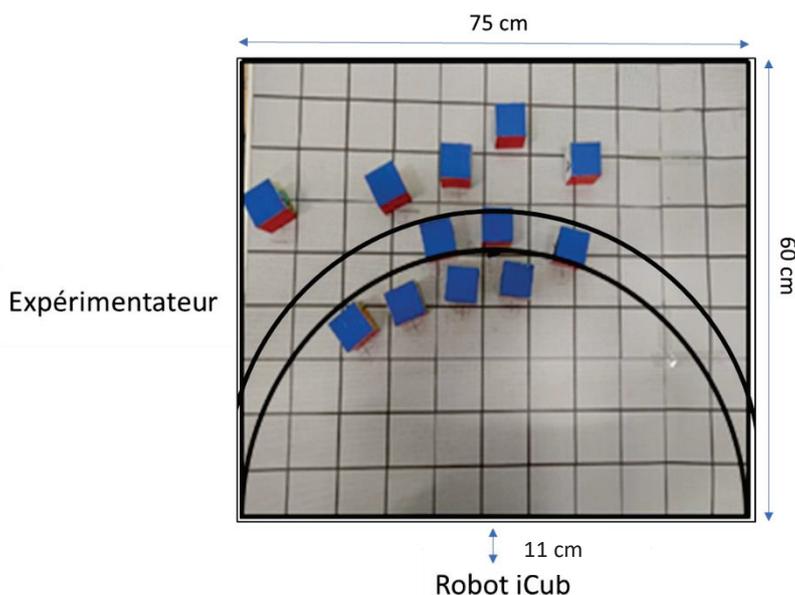
Le matériel nécessaire à la tâche d'évaluation de l'espace péripersonnel du participant est composé d'une table de dimension 75 cmx 150 cm sur laquelle est fixé et centré un rail. Celui-ci permet de faire coulisser une plaque sur laquelle est fixée une sphère en polystyrène de couleur rouge (Figure 6-3). Le centre de la balle est repérable par une marque, du côté expérimentateur, permettant à celui-ci de pointer un télémètre laser pour des mesures de distance. Le déplacement de la balle sur la table le long du rail s'effectue grâce à un système de commande par joystick, piloté par un second expérimentateur, permettant ainsi d'avancer ou de reculer la balle, linéairement le long du rail. La vitesse de défilement est fixée aux alentours de 2,75 cm/s lors de l'expérience.



*Figure 6-3 : Dispositif permettant la mesure de l'espace atteignable par le participant en situation de téléprésence, vu du côté expérimentateur/télémètre à l'opposé du robot. Le télémètre laser, fixé au bout du rail, permet la mesure de la distance entre l'extrémité arrière du télémètre et l'endroit pointé par le faisceau laser (étiquette sur la balle). En insert, une vue de ce que voit le robot.*

### 2.2.3. Matériel nécessaire à la tâche de pointage

Pour la tâche de pointage, une tablette roulante de 50 x 50 cm couverte d'un quadrillage (carrés de 5 x 5 cm) est mise en place à une distance de 11 cm du robot sur laquelle est fixé un échiquier divisé en deux zones, un espace atteignable par le bras du robot, l'espace péripersonnel (EPP), et l'autre espace qui est hors d'atteinte par le bras du robot. Sur l'échiquier sont disposés 12 cubes, face bleu dessus, face rouge face au robot, face verte opposée au robot, face blanche numérotée en noir de 1 à 12, à gauche, vue par l'expérimentateur.



*Figure 6-4 : Représentation et dimensions de l'échiquier sur lequel sont disposés 12 cubes, face bleu dessus, face rouge face au robot, face verte opposée au robot, face blanche numérotée en noir de 1 à 12 à gauche vue par l'expérimentateur. L'arc de cercle donne une indication de l'espace atteignable par le robot iCub compte tenu de sa morphologie. L'arc de cercle supérieur indique la limite au-delà de laquelle les cubes sont hors d'atteinte. Les cubes sont prédisposés sur des repères de telle manière que la moitié puisse être atteinte par le robot. Le robot est positionné à une distance de 11 cm du bord de la table.*

## 3. Le protocole expérimental

Dans une toute première étape introductive, l'expérimentateur décrit les différentes phases expérimentales auxquelles va participer le sujet puis introduit le robot *iCub* qui réalise une séquence de mouvements de tête, main et bras. Une série de mesures anatomiques sont effectuées sur le participant : la longueur totale du bras du sujet entre l'extrémité extérieure de l'épaule à l'extrémité du doigt majeur (LB) ainsi que la longueur de son avant-bras, main comprise, depuis le coude jusqu'à l'extrémité du doigt majeur (LAB). Ces mesures sont

consignées dans une fiche sujet avant d'être intégrées numériquement dans un tableur Excel. Le participant est ensuite assis face à une table pour la durée totale de l'expérience.

### 3.1. *La tâche de bissection d'avant-bras*

Le sujet est positionné contre la table, dos et coude droit appuyé au bord de la table avec la paume de la main droite à plat sur la table. Il a pour consigne de se tenir dans une posture la plus droite possible afin que son avant-bras soit perpendiculaire à son bras. Son avant-bras est recouvert d'un tunnel en plastique qui isole tactilement son avant-bras et sur lequel le sujet viendra pointer avec son index gauche. Les yeux du sujet sont masqués. Au début de chaque essai, l'expérimentateur pose la main gauche du sujet sur le point de départ situé à 52 cm à gauche de la main droite du sujet (Figure 6-5). Le point de départ, établi par l'expérimentateur, diffère à chaque essai avec une alternance de 3 points de départ contrebalancés : Haut (H) (la main gauche est positionnée dans la partie supérieure de la table), Milieu (M) (la main gauche est positionnée au milieu de la table), et Bas (B) (la main gauche est positionnée dans la partie inférieure de la table). À chaque essai, le sujet doit indiquer le milieu de son avant-bras droit en pointant avec son index gauche sur la base du tunnel, évitant ainsi tout repérage sensoriel. Une règle graduée, fixée sur le tunnel, permet de mesurer avec précision la position du pointage. L'expérimentateur mesure la distance (CP) entre le coude et l'emplacement précis du pointage par le sujet (P). 12 mesures sont ainsi effectuées et annotées sur la fiche-sujet avec les points de départs ; H, M et B.

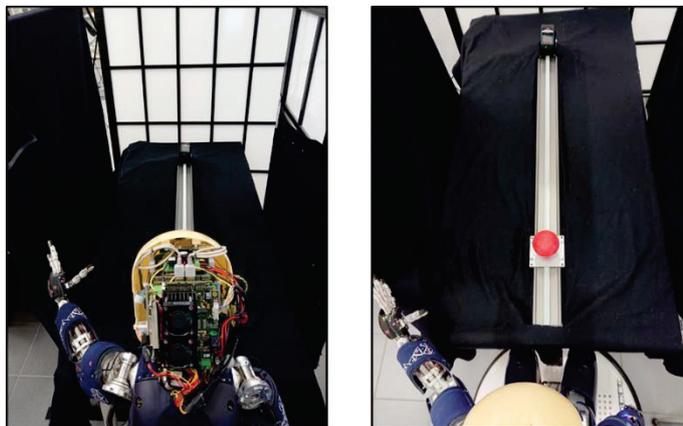


**Figure 6-5 :** Photographie de la tâche de bissection d'avant-bras. Le participant a son bras droit masqué par un tunnel. Les yeux bandés, il doit déterminer en pointant avec son index gauche le point qu'il estime comme étant le milieu de son avant-bras. La distance entre le point et son coude est repérée grâce à une règle graduée, fixée sur le tunnel.

## 3.2. Téléprésence

### 3.2.1. Téléprésence –Espace Péripersonnel-Pré

Le robot *iCub* est installé au préalable devant la table dédiée à la mesure de l'espace péripersonnel (Figure 6-6).



**Figure 6-6 : Le robot *iCub* face à la table dédiée à la mesure de l'espace péripersonnel.**

L'expérimentateur positionne le casque de réalité virtuelle sur la tête du sujet qui réalise une mise au point des lentilles par le biais de curseurs. Le sujet voit l'environnement visuel du robot et se voit ainsi face au rail. L'expérimentateur actionne le robot qui réalise une séquence de mouvements de tête, main et bras, afin que le sujet calibre son espace : « Vous regardez votre main puis regardez-en haut, en bas, puis en haut et en bas et maintenant la balle ».

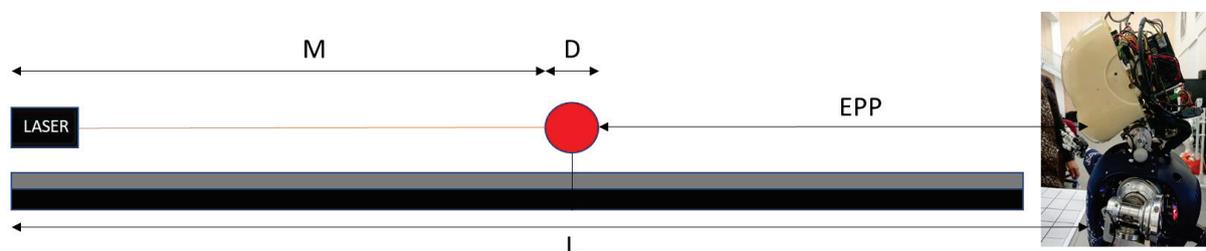
L'expérimentateur donne l'instruction suivante : « La balle rouge va se déplacer sur le rail à vitesse lente, soit en avançant vers vous, soit en reculant. Vous devrez vous imaginer toucher la balle en mouvement sans bouger le torse. Deux types d'essais : - 1) des essais où la balle recule, s'éloigne de vous et où vous devrez indiquer verbalement (stop) l'endroit/la limite spatiale précise à partir de laquelle vous ne pouvez plus toucher/joindre la balle, autrement dit quand la balle n'est plus accessible pour vous sans que vous bougiez et - 2) des essais où, à l'inverse la balle avance vers vous et où vous devrez indiquer l'endroit/la limite spatiale précise pour laquelle vous pouvez toucher/joindre la balle, autrement dit quand la balle est accessible ou atteignable avec votre main. Essayez d'être le plus précis possible et n'hésitez pas à faire repositionner la balle par l'expérimentateur si nécessaire ». Un essai débute par le déplacement de la balle, contrôlé à l'aide d'un joystick par l'expérimentateur situé à distance et non visible par le sujet. Au signal verbal du sujet, la balle est arrêtée et l'expérimentateur relève la mesure de la position (M) de la balle sur le télémètre laser. Entre deux essais, l'expérimentateur

demande au sujet de fermer les yeux, le temps de repositionner la balle pour le prochain essai. La position de départ de la balle sur le rail est, soit à une distance d'environ 70 cm du robot *iCub* si la balle doit avancer vers le robot, soit à une distance d'environ 15 cm si la balle doit reculer.

Pour chaque session avant et après pointage manuel en téléprésence, un total de 12 mesures est recueilli dont 6 mesures pour les avancées de la balle vers le robot ( $A_{LR}$ ) et 6 pour les éloignements du robot  $R_{RL}$  (Figure 6-7). La mesure  $M$  par télémètre est prise toujours au même point, repéré sur la face de la balle non visible par le sujet. De la mesure de  $M$ , on déduit la mesure de EPP, distance quantifiant l'espace péripersonnel du sujet.

$$EPP = L - (M + D)$$

avec  $D$ , diamètre de la balle et  $L$ , distance entre le télémètre et le robot.

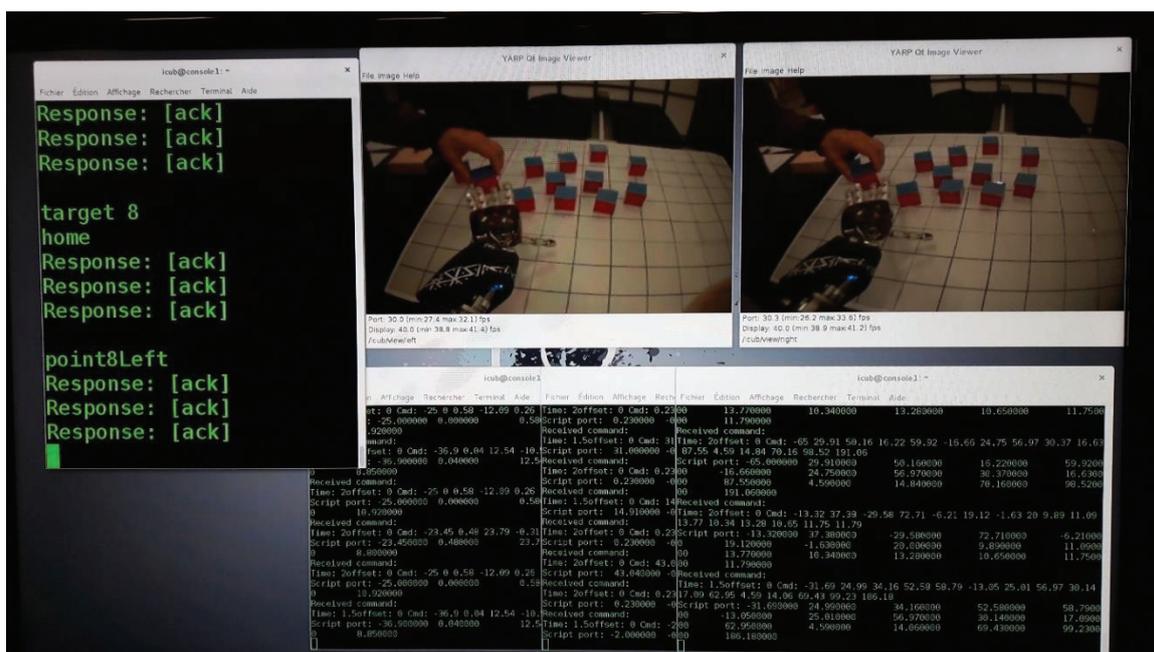


**Figure 6-7 : Schéma du dispositif de mesure de l'espace péripersonnel via une tâche de jugement perceptif d'atteignabilité.**  $M$  est la distance entre l'extrémité extérieure du télémètre laser et le point d'impact du laser sur la balle ;  $L$  est la distance entre l'extrémité extérieure du télémètre laser et le robot *iCub*.  $L = 134,5$  cm ;  $D$  est le diamètre de la balle,  $D = 7,8$  cm. En mesurant  $M$  grâce au télémètre, on en déduit la mesure de EPP, distance quantifiant l'espace péripersonnel du sujet :  $EPP = L - (M + D)$

Une fois la session de mesures de l'EPP terminée, le participant ôte le casque de réalité virtuelle pour un repos de quelques minutes.

### 3.2.2. Téléprésence-Pointage

La tablette munie d'un papier quadrillé est placée face au robot *iCub* et centrée sur son axe corporel, à une distance de 11 cm entre le corps et le bord inférieur de la table. Les positions de la table et du robot *iCub* ont été repérées préalablement grâce à un marquage au sol. Un exemple de ce que voit le sujet via le casque de réalité virtuelle à travers les deux caméras-yeux du robot est présenté dans la Figure 6-8. Comme indiqué précédemment, les 12 cubes numérotés sont placés en des positions fixes répartis entre l'espace péripersonnel de contact et saisie manuels du robot et l'espace extrapersonnel du robot situé au-delà de la limite péripersonnelle.



*Figure 6-8 : Vue sur l'échiquier sur lequel est disposé les cubes : un exemple de ce que voit le sujet via le casque de réalité virtuelle à travers les deux caméras-yeux du robot (photo prise lors des tests de la séquence de pointage). Sur ce même écran est affiché un texte défilant permettant à l'utilisateur de repérer en temps réel les coordonnées des mouvements du robot, en bas, et la séquence et l'item de la séquence en cours, à gauche.*

Le casque de réalité virtuelle est repositionné sur la tête du sujet comme précédemment. L'expérimentateur donne alors ses instructions : « Vous voyez des cubes de couleur placés en face de vous, certains sont joignables, d'autres non. À chaque essai, l'expérimentateur soulèvera un des cubes et vous verrez la main du robot pointer et toucher ou non le cube selon sa position dans l'espace; simultanément au robot, vous devrez réaliser la même tâche de pointage avec votre main en essayant d'être le plus synchrone possible aux mouvements du robot. Après chaque pointage, vous revenez en position de départ qui est celle de la main du robot en position verticale à l'aplomb de l'épaule. Les essais seront répétés ainsi jusqu'à ce que les 10 cubes aient été pointés manuellement par le robot. Ensuite, on passera à une autre séquence. »

Une session de pointage manuel est constituée de 10 séquences, chacune incluant 10 pointages successifs en direction de cubes situés en des positions différentes. Chaque séquence commence au TOP de l'expérimentateur. À chaque essai, l'expérimentateur soulève un cube défini par la séquence en cours jusqu'au pointage par le robot puis le repositionne sur son repère. La main du robot revient en position de départ ainsi que la main du sujet. Une fois les 10 séquences de pointage exécutées, la tablette roulante est alors retirée et le sujet se retrouve face au rail pour une nouvelle évaluation de l'espace péri personnel du sujet.

### 3.2.3. Téléprésence-Espace Péripersonnel-post

Cette tâche est identique à la tâche de Téléprésence-EPP-PRE mais selon une succession inverse des mouvements d'avancée (direction laser-robot) et de recul (direction robot-laser) de la balle.

### 3.3. *Tâche de bissection de l'avant-bras.*

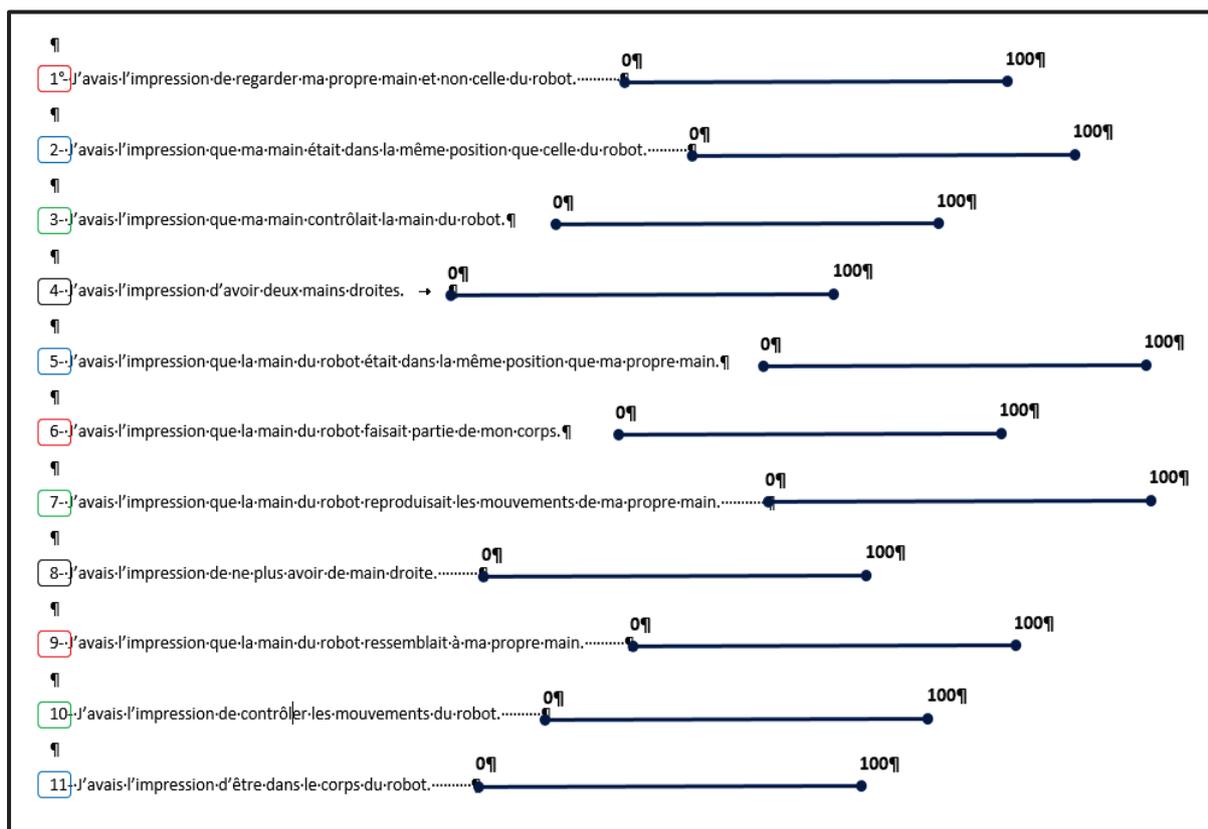
La même tâche de bissection de l'avant-bras est réalisée. 12 mesures sont ainsi effectuées mais selon un ordre inverse de points de départ Haut, Milieu, Bas comparativement à la première passation de la tâche de bissection.

### 3.4. *Questionnaire d'incorporation*

À la fin de l'expérience, le sujet est invité à répondre à un questionnaire permettant de quantifier son degré d'incorporation de la main du robot. Ce questionnaire composé de 11 assertions est présenté dans la Figure 6-9. Il permet d'évaluer le niveau de sensation d'incorporation, sur une échelle subjective située entre 0 (aucune sensation) à 100 (sensation extrêmement forte). En cochant ou barrant la ligne en un point situé entre 0 et 100, le sujet indique le niveau d'incorporation ressenti lors de l'expérience pour chaque assertion. Le score d'incorporation est évalué au travers de trois catégories d'affirmations portant sur :

- La sensation que la main du robot appartient au sujet, soit l'appropriation de la main du robot par le sujet (App), mesurée par 3 questions.
- La sensation que la main du sujet est à l'emplacement de la main du robot ou encore la sensation d'être à l'emplacement du robot, soit la localisation (Loc), mesurée par 3 questions.
- La sensation de contrôler le mouvement du robot, soit l'agentivité (Ag) qui traduit la sensation de contrôle moteur qu'exerce le sujet sur le robot, mesurée par 3 questions.
- Deux affirmations de contrôle sont aussi évaluées.

Le score de chaque catégorie correspond à la moyenne des scores indiqués pour chaque affirmation de cette catégorie.



**Figure 6-9 :** Les 11 assertions du test d'incorporation réparties selon trois catégories d'incorporation : en rouge, l'appropriation du corps (App) (3 questions), en bleu, la localisation (Loc), (3 questions), et en vert, l'agentivité (Ag), (3 questions), et, en noir les deux assertions de contrôle.

### 3.5. Debriefing.

À la vue des résultats du sujet, un *debriefing* a permis de recueillir les impressions du participant, notamment ce qui lui paraissait particulier dans la sensation d'incorporation, dans la perception de la longueur de son bras, etc.

#### 4. Analyse statistique des données

Les variables et facteurs mesurés lors de la tâche de bissection sont :

- La variable BIS, en centimètre, correspondant à la distance entre le coude et le lieu pointé sur l'avant-bras par le participant. Cette variable correspond à la valeur brute mesurée lors de la tâche de bissection.
- La variable BIS.Err correspondant à l'erreur d'évaluation du milieu de l'avant-bras du participant normalisée à la longueur de l'avant-bras du participant (LAB) :

$$BIS.Err = (BIS-LAB/2) / LAB$$

Cette variable permet de quantifier l'erreur d'évaluation entre le schéma corporel interne de l'avant-bras du participant par rapport à la mesure anatomique de son avant-bras.

- Le facteur DEP correspond au point de départ de la position de la main gauche du participant avant la tâche de bissection, cette variable a trois modalités H (haut), M (milieu), B (bas).
- Le facteur PREPOST de la tâche de bissection : PRE (en début d'expérience) et POST (en fin d'expérience).

Les variables et facteurs mesurés lors de la tâche de quantification de l'espace péripersonnel sont :

- La variable EPP, en centimètre, correspondant à la distance de jugement d'atteignabilité de la balle par le sujet.
- La variable EPP.Err correspondant à la différence normalisée entre la variable EPP et la longueur du bras du participant (LB) :

$$EPP.Err = (EPP-LB)/LB$$

Cette variable permet de quantifier la différence entre l'espace péripersonnel perçu et l'espace péripersonnel réel relié à l'anatomie du participant.

- Le facteur SENS de déplacement de la balle, à deux modalités : en avancée du laser vers le robot ( $A_{LR}$ ) et en recul du robot vers le laser ( $R_{RL}$ ).
- Le facteur PREPOST de la tâche de quantification de l'espace péripersonnel : PRE (avant la tâche de pointage) et POST (après la tâche de pointage)

À partir des réponses au questionnaire d'incorporation, le score de la variable incorporation du participant est mesuré sur l'échelle subjective de 1 à 100 pour chaque affirmation. Le score INC de chaque catégorie d'incorporation (App, Loc et Ag) résulte de la moyenne des scores obtenus pour l'ensemble des affirmations de cette catégorie. La variable incorporation sera étudiée en fonction du facteur catégorie d'incorporation, CAT.

L'analyse statistique des scores des variables BIS, BIS.err, EPP, EPP.err, et INC a été menée suivant les facteurs *PREPOST*, *SENS*, *DEP* et *CAT*, selon la variable considérée. Une approche statistique d'étude de normalité et d'homogénéité des variances de chaque variable a été effectuée. Dans l'expérience décrite ici, la distribution des données répondait aux hypothèses de normalité et d'homogénéité de la variance à  $p > 0,05$ . Des analyses de variances ANOVA et des tests paramétriques statistiques ont été réalisées avec le progiciel STATISTICA pour les différents scores. Pour la variable INC, une procédure Test T pour échantillon unique a été utilisée afin de tester si la moyenne du score INC diffère de la valeur nulle.

## 5. Résultats préliminaires

### 5.1. *Tâche de bissection d'avant-bras*

Compte tenu du faible nombre de sujets, nous présentons ici les résultats préliminaires sur la variable de position BIS, exprimée en centimètre, et l'erreur normalisée d'estimation de la position BIS.err, exprimée en pourcentage, en fonction du facteur PREPOST, et du facteur DEP, Point de départ de la tâche. Nous observons qu'effectivement, après la tâche de pointage effectuée en téléprésence par le participant, l'estimation de la position de l'avant-bras est toujours plus petite :

$$\langle \text{BIS}_{\text{PRE}} \rangle = (17,97 \pm 5,45) \text{ cm} ; \langle \text{BIS}_{\text{POST}} \rangle = (16,69 \pm 5,03) \text{ cm}$$

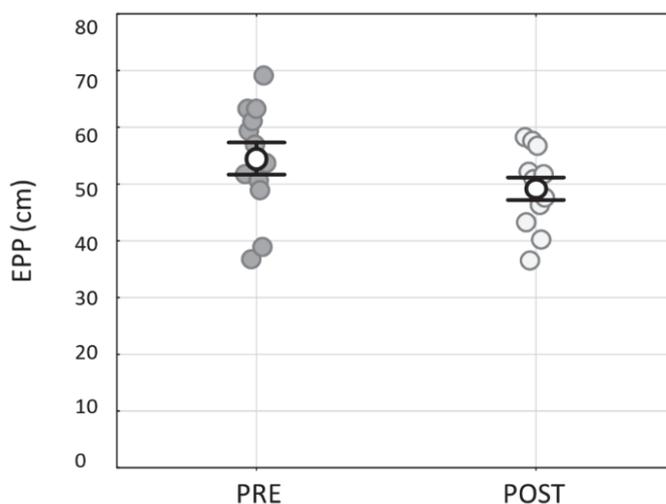
$$\langle \text{BIS.err}_{\text{PRE}} \rangle = (-10,23 \pm 15,11) \% ; \langle \text{BIS.err}_{\text{POST}} \rangle = (-13,25 \pm 9,81) \%$$

Le robot *iCub* ayant une longueur de bras de l'ordre de 41 cm environ, suite à la tâche de pointage effectuée en immersion dans le robot, le participant perçoit une diminution de la longueur de son avant-bras induite par la morphologie du bras du robot. Selon le point de départ de la main qui indique le milieu de l'avant-bras, le participant semble faire une plus grande erreur d'estimation de la position de son avant-bras lorsque la main indicative est au point de départ au niveau du coude (main gauche positionnée dans la partie inférieure de la table)

comparativement aux deux autres positions de point de départ, main gauche positionnée au milieu ou dans la partie supérieure de la table.

## 5.2. *Mesure de l'espace péripersonnel*

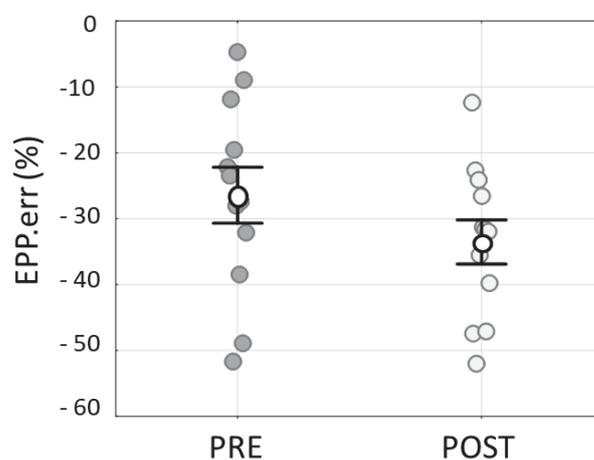
Les résultats présentés dans la Figure 6-10, concernant la tâche de quantification de l'espace péripersonnel, montrent que la distance de jugement d'atteignabilité, EPP, exprimée en centimètre, dépend de la situation PRE/POST (effet principal de la situation PRE/POST :  $F(1,5) = 12,935$ ,  $p < 0,05$ ,  $\eta^2 = 0,721$ ,  $\alpha = 0,999$ ). La mesure moyenne de EPP en situation POST est significativement diminuée par rapport à la situation PRE ( $\langle EPP_{PRE} \rangle = (54,50 \pm 13,43)$  cm ;  $\langle EPP_{POST} \rangle = (49,17 \pm 8,61)$  cm). En revanche, EPP ne semble pas dépendre du sens de déplacement de la balle sur le rail (pas d'effet principal de SENS :  $F(1,5) = 0,37$ ,  $p > 0,25$ ,  $\eta^2 = 0,721$ ). La comparaison entre la situation PRE/POST et le SENS ne donne pas d'effet d'interaction ( $F(1,5) = 0,006$ ,  $p > 0,25$ ,  $\eta^2 = 0,001$ ).



**Figure 6-10 :** Distance de jugement d'atteignabilité, EPP, exprimée en centimètre, en fonction de la situation expérimentale, avant (PRE) et après (POST) la tâche de pointage. Les valeurs reportées sont celles obtenues indifféremment pour les deux sens de déplacement de la balle : en avancée du laser vers le robot (ALR) et en recul du robot vers le laser (RRL). La moyenne est représentée par un symbole, rond creux, et la barre d'erreur par le trait vertical associé (écart type).

Après calcul de la différence entre la dimension de l'espace péripersonnel quantifiée par le sujet et sa longueur de bras (« seuil d'atteignabilité »), les résultats à la tâche de quantification

de l'espace péripersonnel montrent, comme illustré sur la Figure 6-11, que EPP.Err, exprimé en pourcentage de la longueur du bras, dépend de la situation PRE/POST (effet principal de la situation PRE/POST :  $F(1,5) = 13,90$ ,  $p < 0,05$ ,  $\eta^2 = 0,735$ ,  $\alpha = 0,842$ ). La diminution estimée de l'espace personnel en situation POST est significativement renforcée par rapport à la situation PRE ( $\langle \text{EPP.Err}_{\text{PRE}} \rangle = -26,44 \pm 20,62$ ,  $\langle \text{EPP.Err}_{\text{POST}} \rangle = -33,54 \pm 15,95$ ). En revanche, ces résultats ne dépendent pas du sens de déplacement de la balle sur le rail (pas d'effet principal du facteur SENS :  $F(1,5) = 0,397$ ,  $p > 0,25$ ,  $\eta^2 = 0,074$ ). L'interaction entre les facteurs PREPOST et SENS ne montre pas d'effet ( $F(1,5) = 0,036$ ,  $p > 0,25$ ,  $\eta^2 = 0,007$ ).



**Figure 6-11 : Différence entre la distance de jugement d'atteignabilité et la longueur du bras du participant, normalisée à la longueur de l'avant-bras, EPP.err, exprimée en pourcentage de la longueur du bras, en fonction de la situation expérimentale, avant (PRE) et après (POST) la tâche de pointage. Les valeurs reportées sont celles obtenues indifféremment pour les deux sens de déplacement de la balle : en avancée du laser vers le robot (ALR) et en recul du robot vers le laser (RRL). La moyenne est représentée par un symbole, rond creux, et la barre d'erreur par le trait vertical associé (écart type).**

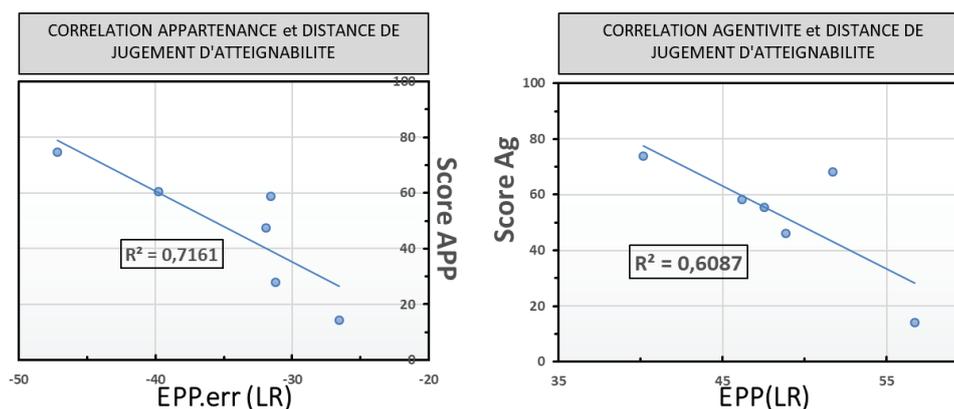
### 5.3. Incorporation

Conformément à ce qui était attendu, le niveau d'incorporation est significativement différent de la valeur 0 (Test T par rapport à la valeur référente 0) pour les catégories appartenance, localisation et agentivité mais pas pour la catégorie « contrôle » : Ctrl ( $p = 0,1646$ ), App ( $p = 0,0036$ ), Loc ( $p = 0,0028$ ), Ag ( $p = 0,0017$ ). Ainsi, on remarquera une sensation d'incorporation non-nulle après téléprésence robotique relativement distribuée en

terme de catégorie :  $\langle \text{App} \rangle = 47,27 \pm 11,20$  ;  $\langle \text{Loc} \rangle = 59,10 \pm 13,21$  ;  $\langle \text{Ag} \rangle = 52,67 \pm 10,62$  ;  $\langle \text{Ctrl} \rangle = 7,46 \pm 5,61$ . Il n'y a pas d'effet principal de la catégorie d'incorporation ( $F(2,10) = 0,669, p > 0,25, \eta^2 = 0,118$ ).

#### 5.4. Corrélations entre les différentes variables

Une analyse des corrélations entre les variables d'incorporation selon la catégorie et les différentes variables BIS et EPP ont permis d'en déduire les coefficients de corrélation de Pearson,  $r$  ( $\text{INC-CAT}, V_{\text{cognition sociale}}$ ) qui donnent des informations sur l'ampleur et l'orientation de la corrélation étudiée. Une corrélation significative au seuil de 0,05 est observée entre les variables  $\text{INC}_{\text{App}}$  et  $\text{EPP.err}(\text{RL})$  ( $r = 0,712, p = 0,034$ ) illustrée dans la Figure 6-12A. Une tendance de corrélation entre les variables  $\text{Ag}$  et  $\text{EPP}(\text{RL})$  est observée ( $r = 0,609, p = 0,08$ ).



**Figure 6-12 : Corrélations entre des composantes de la variable d'incorporation et les variables quantifiant l'espace péripersonnel du participant : A) Corrélation entre les variables *App* et *EPP.Err*, exprimée en pourcentage de la longueur du bras du sujet, mesurées après la tâche de pointage et lorsque la balle approche du robot (sens Laser Robot). La pente négative traduit le fait que cette distance de jugement d'atteignabilité est d'autant plus réduite que la sensation illusoire d'appartenance de la main du robot est élevée. En bleu est tracée la droite de corrélation significative de Pearson au seuil de significativité de 0,05. B) Tendance de corrélation entre les variables *Ag* et *EPP*, exprimée en centimètre, *EPP* étant la distance de jugement d'atteignabilité mesurée après la tâche de pointage et lorsque la balle approche du robot (sens Laser Robot). En bleu est tracée la droite de régression mais non significative ( $p = 0,08$ ).**

## 6. Synthèse

Nous avons développé des mesures objectives de grandeurs caractéristiques de la représentation de l'espace péripersonnel en terme d'espace atteignable et de schéma interne corporel. L'objectif est de mesurer la plasticité de la représentation de l'espace péripersonnel en corrélation avec des mesures subjectives d'incorporation en immersion dans le robot humanoïde *iCub* de la taille d'un enfant. Banakou et ses collaborateurs (Banakou *et al.*, 2013) avait montré, en induisant successivement chez des participants l'illusion de posséder un corps d'enfant de quatre ans puis celui de posséder un corps d'adulte, qu'il existe des corrélations perceptives et probablement comportementales des illusions d'appartenance du corps qui se produisent en fonction du type de corps dans lequel se produit l'incorporation. Les résultats préliminaires de l'expérience espace-pointage, menée sur seulement six sujets, suggèrent effectivement, à la simple observation des mesures, qu'il y a une diminution de l'estimation en termes d'étendue de l'espace atteignable du sujet après la tâche de pointage lorsque le sujet réalise des mouvements de pointage en tant que robot et voit sa main en tant que main robotique pointer des cubes disposés sur un échiquier. Cette observation est cohérente avec la morphologie du robot *iCub* apparentée à la taille d'un enfant. Le schéma corporel du sujet, qui est évalué par la mesure de la position estimée du milieu de son avant-bras comme indicateur de cette représentation, est perçu comme plus proche par le sujet après la tâche de pointage. Cette contraction de l'espace péripersonnel est en accord avec les théories incarnées et situées de la cognition selon lesquelles les processus cognitifs dépendent du corps et de la situation dans laquelle ils se déroulent reposant notamment sur l'interaction entre les différents systèmes sensorimoteurs (par exemple, Coello & Delevoeye-Turrell, 2007). Après téléprésence robotique, les participants ont eu une perception illusoire d'incorporation envers la main du robot plutôt distribuée en termes d'appartenance, de localisation et d'agentivité. Ces expériences sont à poursuivre et les éventuelles corrélations entre les mesures subjectives et objectives seront explorées.



## Chapitre 7 : Discussion

Notre paradigme expérimental, fondé sur la capacité à s'incarner dans un robot, a eu pour objectif d'explorer les contributions sensorimotrices/sensorielles à la représentation de soi et leurs conséquences sur les sentiments sociaux suscités envers les robots, dans deux situations d'interaction homme-robot : en situation de téléprésence robotique et en interaction directe face-à-face. La plasticité de la représentation du soi corporel a été questionnée en évaluant les modifications des composantes du sentiment d'incorporation que sont les sensations d'appartenance incluant l'appropriation du corps (la sensation que le corps ou une partie du corps du robot appartient au sujet) ou du visage (la sensation que son visage ressemble à celui du robot), de localisation (la sensation d'être à l'emplacement du robot) et d'agentivité (la sensation de contrôler le mouvement du robot), dans les deux situations d'interaction homme-robot. Sentiment ou indistinctement sensation d'incorporation fait référence ici à l'expression anglaise *sense of embodiment* utilisée dans la littérature, et similairement, *sense of ownership*, *sense of enfacement*, *sense of location* et *sense of agency*, pour ses différentes composantes. Dans ce paradigme, l'incorporation dans les robots a été induite de deux manières : soit en générant des mouvements de tête synchrones entre le robot et le sujet, soit en caressant simultanément avec un pinceau le même emplacement des visages du sujet et du robot. En situation de téléprésence robotique où le robot fait face à un miroir, le sujet qui voit à travers les yeux du robot, se perçoit comme un robot. Lorsqu'il est face au robot, le sujet est dit en interaction active avec le robot lorsque tous deux effectuent des mouvements de tête synchrones, ou, en interaction passive lorsque leurs deux visages sont stimulés tactilement simultanément. L'effet des stimulations visuo-motrices et visuo-tactiles sur les variables étudiées était analysé par comparaison des stimulations synchrone et asynchrone (contrôle) entre le visage du sujet et celui du robot. De plus, en situation de téléprésence robotique, l'incorporation générée par des mouvements de tête synchrones a été aussi comparée à la situation où la tête du robot restait immobile.

Ces travaux montrent que, si le sentiment illusoire d'incorporation dans le robot est toujours présent, il prédomine nettement lorsque les manipulations sensorimotrices sont **synchrones** entre sujet et robot. Également, le sentiment illusoire d'incorporation est en règle

générale significativement plus fort en **téléprésence**, lorsque le sujet se voit en tant que robot, que, lorsqu'il fait face au robot, en situation d'interaction sociale. En outre, nous avons observé que la sensation d'incorporation au sein d'un robot est **multiforme** et diffère selon la manipulation multimodale employée. Plus précisément, bien que les sentiments illusoire d'appartenance, de localisation, et d'agentivité soient fortement impactés lors de manipulations sensorielles tactiles, l'agentivité l'est de manière singulière lors de manipulations motrices utilisant le même paradigme. Lorsque le sujet se voit en tant que robot, des mouvements de tête synchrones entre le robot et le participant augmentent significativement cette sensation d'incorporation essentiellement à travers la **sensation d'agentivité**, alors que des stimulations tactiles synchrones des deux visages augmentent de manière non différenciée les sentiments d'agentivité, de délocalisation et d'appartenance du corps. Seule la sensation d'appropriation des traits du visage, toujours d'une intensité inférieure aux autres sensations, reste peu ou non dépendante de l'information temporelle, synchrone et asynchrone, et donc de l'effet de la stimulation, quelle que soit sa modalité. En ce qui concerne la sensation de délocalisation, la situation de téléprésence génère une sensation plus forte de délocalisation au sein du robot par rapport à la situation où le sujet est face au robot.

Concernant l'impact de l'incorporation sur la **cognition sociale** –interrogées ici à travers l'évaluation des sentiments sociaux tels que la sympathie et l'affinité du sujet envers le robot–, ces travaux démontrent, qu'en situation de téléprésence robotique, la sensation d'incorporation peut s'accompagner d'une plus grande acceptation sociale du robot. De manière intéressante, la force de ces sentiments sociaux positifs envers le robot peut être concomitante d'une forte émergence du sentiment d'incorporation. Mais, cette incorporation ne suffit pas pour rendre un robot acceptable : cela dépend de la **nature de l'information**, sensorielle pure ou sensorimotrice, qui génère ce sentiment d'incorporation. Plus précisément, du point de vue des marqueurs sociaux évalués ici, le sujet ayant expérimenté la sensation d'incorporation suite à une induction motrice synchrone éprouve une plus grande sympathie envers le robot et/ou ressent plus d'affinité envers celui-ci. Par contre, lorsque l'illusion d'incorporation dans le robot est induite par manipulation visuo-tactile en situation de téléprésence, les sentiments sociaux du sujet envers le robot restent indépendants de la stimulation, puisqu'ils ne diffèrent pas significativement entre une stimulation synchrone et asynchrone. Ainsi, des mouvements de tête synchrones induisent toujours plus de sympathie et/ou d'affinité envers le robot, et cela est observé en immersion dans le robot en se voyant en tant que robot et de manière moindre, en situation face au robot. Le miroir, vecteur d'information cognitive implicite du soi, agit sur les composantes de cognition sociale et suscite une plus grande acceptabilité du robot. Par

ailleurs, si l'effet de la temporalité sur les marqueurs sociaux n'est pas retrouvé en situation visuo-tactile par rapport à la situation visuo-motrice, un sentiment d'affinité envers le robot est observé en relation avec le degré d'incorporation rapporté lors des stimulations tactiles asynchrones. Concernant la question de l'interaction sociale soi-autrui, il est à noter que, si le sentiment d'incorporation robotique peut contribuer aux changements de perception sociale lors d'interactions homme-robot, ce n'est qu'au travers de manipulations motrices que ces effets sur la cognition sociale s'expriment de manière significative dans toutes dans toutes les dimensions étudiées.

Ces travaux mettent aussi en évidence le fait que la **morphologie et l'apparence du robot** ne sont pas des paramètres déterminants pour induire un fort sentiment d'incorporation ; l'interaction entre le sujet et le robot semble être indépendante du type de robot, humanoïde ou non-humoïde.

Par la suite, nous discuterons de la plasticité de la représentation de soi en immersion dans un robot ou face à un robot. C'est la contribution sensorimotrice au sentiment illusoire d'incorporation, reflet de cette malléabilité, qui sera questionnée puis comparée à une contribution sensorielle pure. Nous évoquerons alors les conséquences de cette expérience d'incorporation sur les sentiments affectifs ou sociaux envers le robot. En regard de ces points, la question de l'apparence et la morphologie du robot, humanoïde et non-humoïde, sera abordée.

## 1. Incorporation et représentation de soi

### **Agir et se voir agir en tant que robot : les mécanismes visuo-moteurs de l'incorporation**

Comment une information visuo-motrice peut-elle générer un sentiment illusoire d'incorporation dans un robot, humanoïde ou non humanoïde ? Dans cette situation d'incorporation active, en référence à l'expérience d'illusion active de la main en caoutchouc (Kalckert & Ehrsson, 2012), lorsque les têtes du sujet et du robot se déplacent de façon synchrone, le sujet ressent une forte sensation de contrôler le robot. Cette synchronie en perspective en première personne favorise le sentiment d'agentivité sur le robot et, bien que moins important, un sentiment de délocalisation de soi à l'intérieur du corps du robot. Lorsque le sujet est face au robot, seuls les mouvements de tête synchrones induisent aussi un sentiment d'agentivité significatif mais ils ne génèrent plus de sentiment de délocalisation de soi. Ces

résultats sont en accord avec plusieurs observations antérieures (Kalckert & Ehrsson, 2012, 2014 ; Kammers *et al.*, 2009) issues de la version active du paradigme de l'illusion de la main en caoutchouc de Botvinik et Cohen (1998). Dans cette adaptation, l'incorporation par des mouvements volontaires du sujet est comparée à une situation où les mouvements dits passifs sont induits par un tiers. Ces auteurs ont étudié l'émergence concomitante et la dissociation des sentiments d'agentivité et d'appartenance lors de l'illusion (Tsakiris *et al.*, 2006 ; Dummer *et al.*, 2009 ; Kalckert & Ehrsson, 2012 ; Braun *et al.*, 2014 ; Caspar *et al.*, 2015 ; Jenkinson & Preston, 2015). En 2012, Kalckert et Ehrsson ont proposé une expérimentation active de l'illusion de la main en caoutchouc dans laquelle le doigt de la main factice se déplace de manière synchrone au doigt du participant, qui lui est occulté visuellement. Comme dans le paradigme de l'illusion classique, les participants développent un sentiment d'appropriation de la main factice lorsque les mouvements des doigts, vus et ressentis, sont synchrones. L'illusion dépend de l'intégration des informations visuelles et kinesthésiques sur les mouvements des doigts et peut être induite avec des mouvements de doigts actifs comme passifs. Cependant, dans le cas actif, les processus de contrôle moteur sont engagés et les participants ressentent un sentiment d'agentivité, ils ont l'impression de générer et de contrôler les mouvements de la main en caoutchouc. Kalckert et Ehrsson (2012) ont ainsi mené une étude systématique sur l'interaction entre le sentiment d'appartenance et le sentiment d'agentivité en variant la temporalité du mouvement des doigts –synchrone versus asynchrone–, le mode volontaire ou passif de l'action et la congruence posturale –la position alignée ou non alignée de la main artificielle par rapport à la main réelle du participant–. Leurs résultats ont montré qu'un fort sentiment d'agentivité émergeait lors de mouvements volontaires synchrones en concomitance avec un sentiment d'appartenance néanmoins plus faible. En condition asynchrone, le sentiment d'appartenance disparaît mais il reste un sentiment illusoire d'agentivité non négligeable bien que beaucoup plus faible.

Des approches similaires en téléopération immersive d'un sujet humain dans un robot ont été récemment développées. Un sentiment d'appartenance et d'agentivité de tout le corps a été induit envers des androïdes grandeur nature se déplaçant et réalisant des mouvements en synchronie avec ceux des participants (Nishio *et al.*, 2012). Similairement, dans notre expérience, un fort sentiment d'agentivité a été induit envers des robots effectuant des mouvements en synchronie avec ceux des participants. De plus, les participants, se voyant en tant que robot face au miroir, ont éprouvé un sentiment de localisation dans le corps du robot. Aymerich-Franch et ses collaborateurs (2015) ont précédemment observé qu'une immersion

dans un robot, avec une rétroaction visuo-auditive congruente, pouvait conduire à l'émergence d'un sentiment d'incorporation envers un robot humanoïde en situation de marche. Les participants à cette étude ont éprouvé un sentiment d'agentivité même lorsqu'ils ne contrôlaient pas le robot. Les sentiments illusoire d'agentivité et d'appartenance du corps n'ont pas été affectés par le contrôle partiel et retardé du robot –avec des retards de 0,5 à 2 s–. Aymerich-Franch et ses collaborateurs (2016) ont aussi mis en évidence la capacité du sujet à développer un sentiment d'incorporation du corps du robot, tout en gardant un sentiment de localisation dans son propre corps (illusion d'une localisation dédoublée). En utilisant un système d'interface cerveau-ordinateur pour contrôler un androïde, Alimardani et ses collaborateurs (2013) ont induit l'illusion d'incorporation dans la main du robot lorsque le sujet imaginait un mouvement –tâche motrice par imagerie mentale– et regardait le robot l'exécuter. La corrélation entre le mouvement intentionnel et la vision du mouvement réel suffit à produire un sentiment illusoire d'appartenance. Ces auteurs ont aussi montré que la performance lors de la tâche d'imagerie motrice était meilleure avec des mains d'apparences humaines qu'avec des pinces métalliques (Alimardani *et al.*, 2016). De manière intéressante, cette approche utilisant le système *Brain Computer Interface* suggère que l'incorporation dans un robot est fortement ancrée dans les processus visuo-moteurs. Sous l'angle du réalisme visuel de notre expérience, la différence d'apparence des deux robots, humanoïde et non-humoïde, n'a pas induit de différence sur le sentiment d'incorporation : l'interaction entre le sujet et le robot est apparue indépendante du type de robot, qu'il soit humanoïde ou non-humoïde. Cette apparence des deux robots sera discutée dans la suite.

Sur la base des observations de la littérature et de nos propres résultats, on peut penser que la sensation illusoire d'incorporation provient de l'intégration multimodale de signaux corporels contradictoires. Dans le cas de la sensation de contrôle des mouvements du robot ou agentivité, ce sont les signaux moteurs –la copie efférente–, visuels et proprioceptifs qui sont intégrés. En voyant dans un miroir, comme image de soi, un robot animé des mêmes mouvements que le sujet, ou encore, en voyant le robot face à lui effectuant le même mouvement, le participant a ressenti une impression vive de contrôle volontaire des mouvements du robot. En conséquence, au cours de notre expérience utilisant des manipulations motrices, il est probable que ces manipulations déclenchent le sentiment d'agentivité lié à une causalité intentionnelle, comme l'explique le modèle de comparaison classique du contrôle moteur (Kawato *et al.*, 1999 ; Wolpert *et al.*, 1995). Sur cette base théorique, une copie de la commande motrice, c'est-à-dire la copie efférente prédisant les

conséquences sensorielles de l'action, est comparée au résultat sensoriel effectif pour donner lieu ou non à une erreur de prédiction motrice. Cette erreur de prédiction est déduite de la comparaison entre l'état prédit déterminé par la copie efférente et l'état réel donné par le retour sensoriel. Lorsqu'il y a similitude des deux états, les conséquences de l'action sont considérées comme provenant de soi, et un sentiment d'agentivité est alors généré. Dans le cas d'une disparité des signaux, les conséquences sensorielles de l'action sont imputées à une source externe. (Synofzik *et al.*, 2008 ; Moore & Obhi, 2012).

### **Se sentir à la place du robot : une question de perspective ?**

Lorsqu'un sentiment de délocalisation dans le robot est généré, il est présent uniquement lorsque le sujet se voit dans un miroir en tant que robot en mouvement. C'est la perspective en première personne du sujet, alors en immersion dans le robot lors de la stimulation et se voyant en tant que robot, qui est déterminante pour induire l'illusion de délocalisation dans le corps du robot. Ceci est observé par exemple lors des expériences sur le corps entier en perspective en première personne (Maselli & Slater, 2014 ; Petkova & Ehrsson, 2008 ; Slater *et al.*, 2010). En effet, impliquant des corps virtuels ou des mannequins, les expériences d'illusion du corps entier ont montré que le sentiment d'appartenance peut être transféré vers un autre corps. En outre, dans leur expérience pionnière, Lenggenhager et ses collaborateurs (2007) ont utilisé des données visuelles et somatosensorielles contradictoires en réalité virtuelle pour perturber l'unité spatiale entre le soi et le corps. Les participants ont eu l'impression que le corps virtuel vu devant eux (perspective en troisième personne) était leur propre corps délocalisé vers ce corps virtuel à une position en dehors de leurs frontières corporelles. Ces résultats indiquent que l'unité spatiale et la conscience du soi corporel peuvent être étudiées expérimentalement et sont fondées sur le traitement multisensoriel et cognitif de l'information corporelle. Par ailleurs, dans le domaine des applications en réalité virtuelle, ces dernières reposent essentiellement sur la transposition du point de vue des utilisateurs dans une perspective en première personne. Dans ce contexte, récemment, Gorisse et ses collaborateurs (2018) ont comparé l'impact et les potentialités de l'intégration de la perspective en troisième personne dans des environnements virtuels immersifs. Leur étude confirme la pertinence d'utiliser la perspective en première personne pour induire un sentiment d'incorporation envers un corps virtuel, en particulier en termes de localisation du soi et d'appartenance. Cependant, aucune différence significative n'a été observée entre les deux perspectives en ce qui concerne le sentiment d'agentivité dans cette étude.

## **Sans l'action, quels changements ? les mécanismes sensoriels de l'incorporation**

Mais comment une information sensorielle pure génère-t-elle un sentiment illusoire d'incorporation et en quoi cela diffère de la contribution sensorimotrice ? Dans cette situation d'incorporation que l'on dirait passive, le sujet se voit dans le miroir tel un robot dont la joue est stimulée à l'aide d'un pinceau et ressent cette même caresse sur sa propre joue. Cela produit une perception illusoire d'incorporation plus distribuée en termes d'appartenance, de localisation et d'agentivité, et significativement plus élevée lorsque les stimulations sensorielles sont synchrones. En situation asynchrone, le sentiment illusoire d'incorporation reste non négligeable. Preston et ses collaborateurs, (2015) ont décrit un fort sentiment d'appartenance vis-à-vis d'un corps artificiel vu au travers d'un miroir pendant une caresse simultanée du mannequin et du corps du participant. Des auteurs ont questionné la nécessité d'une telle synchronisation visuo-tactile. Certaines études ont montré que des décalages spatio-temporels entre la vision et le toucher inhibent significativement l'illusion de la main en caoutchouc (Armel & Ramachandran, 2003 ; Ehrsson *et al.*, 2004 ; Slater *et al.*, 2008). Des résultats similaires ont été obtenus pour le sentiment d'appartenance envers un mannequin vu en perspective en première personne : les participants ont perçu le corps du mannequin comme leur corps, lors de caresses tactiles synchrones, mais pas lorsqu'elles étaient asynchrones (Petkova & Ehrsson, 2008). Cependant, d'autres études ont montré que, bien que les signaux multisensoriels visuo-tactiles synchrones renforcent l'illusion, ils ne sont pas nécessaires à l'émergence du sentiment d'appartenance (Maselli & Slater, 2013 ; Keizer *et al.*, 2016). Ainsi, alors que la synchronie visuo-tactile peut améliorer l'illusion, elle n'est pas cruciale pour induire un sentiment illusoire d'incorporation, qui peut même émerger de signaux sensoriels asynchrones. En s'affranchissant de l'effet de synchronie de la stimulation tactile qui a pour conséquence de renforcer le sentiment d'incorporation, nos résultats ont aussi mis en évidence que, quelle que soit la temporalité de l'induction, les sujets ont pu ressentir que la tête du robot leur appartenait (sentiment d'appartenance), qu'ils étaient à la place du robot (sentiment de délocalisation) et qu'ils étaient capables de contrôler les mouvements du robot (sentiment d'agentivité) et, dans une moindre mesure, que les traits du visage du robot étaient les leurs.

## **Mécanismes dissociés sensoriel et moteur de l'incorporation**

En résumé, en comparant les deux types de manipulations utilisées dans nos études robotiques, on note que les illusions d'incorporation apparaissent significatives principalement

en terme d'agentivité et à un degré moindre en terme de localisation lors d'une induction motrice, et en terme d'appartenance, de localisation et d'agentivité lors d'une induction sensorielle. Ces résultats suggèrent des mécanismes dissociés liés à la modalité des indices d'induction qui génère le sentiment d'incorporation, en particulier l'agentivité. Dans leur étude systématique sur l'interaction entre le sentiment d'appartenance et le sentiment d'agentivité, Kalckert et Ehrsson (2012) ont démontré expérimentalement qu'ils pouvaient être doublement dissociés. D'une part, le sentiment d'appartenance et le sentiment d'agentivité pouvant émerger indépendamment dans certaines conditions, ils seraient induits par deux processus cognitifs distincts. Cependant, lorsque les conditions expérimentales permettent leur émergence concomitante, ils se renforceraient mutuellement (Braun *et al.*, 2014 ; Kalckert & Ehrsson, 2012). D'autre part, contrairement à Kalckert et Ehrsson (2012), la plupart des études de neurosciences cognitives portant sur l'agentivité ne font aucune distinction fondamentale entre les mouvements simples des membres du corps et les actions axées sur des objectifs. Sur la base de leurs résultats expérimentaux, Kalckert et Ehrsson (2012) ont suggéré que le sentiment d'agentivité lui-même n'est pas unitaire et peut être dissocié en deux composantes associées à des processus distincts : -1) le sentiment d'agentivité externe liée à la commande motrice volontaire qui est un sentiment d'agentivité dirigé vers un but et -2) le sentiment d'agentivité du corps étroitement lié au sentiment d'appartenance observé lors de manipulations passives sans aucune commande motrice. Comparativement aux conclusions de ces auteurs, est-ce que nos résultats relèvent de deux processus distincts d'incorporation dépendant du mode d'induction, moteur ou tactile ? Lorsque le sujet se voit en tant que robot, la comparaison entre les manipulations visuo-motrices et visuo-tactiles, montrent deux comportements d'incorporation différents -1) D'une part, des changements modérés dans les sentiments d'appartenance, de délocalisation et d'agentivité générés par les informations purement sensorielles issues de stimulation tactiles simultanées des visages du sujet et du robot -2) D'autre part, des changements intenses et spécifiques dans le sentiment d'agentivité, et dans une moindre mesure dans le sentiment de délocalisation, générés par les informations sensorimotrices lors des mouvements de têtes synchrones entre le sujet et le robot. Sur la base de ces deux phénomènes illusoire, nous suggérons que les effets observés lors de la téléprésence robotique reflètent deux types de processus neurocognitifs qui sous-tendent le sentiment d'incorporation : - 1) l'un lié à une commande motrice intentionnelle déclenché lors des interactions visuo-motrices et responsable de l'action volontaire externe –*external agency*–et -2) l'autre indépendant de toute commande motrice, déclenché par une manipulation

visuo-tactile, situation passive, responsable du sentiment illusoire d'agentivité du corps –*body agency*– en même temps que de l'appartenance du corps –*body ownership*– et de la localisation du corps –*self-location*– probablement issus d'un mécanisme cognitif similaire.

Cette hypothèse de deux processus distincts générant l'incorporation est confortée par les modèles neurocognitifs décrivant le sentiment d'agentivité et le sentiment d'appartenance. Différents modèles ont été successivement élaborés afin d'expliquer la représentation du soi corporel dont la malléabilité a été mise en évidence et étudiée à travers les résultats issus des nombreuses adaptations du paradigme de l'illusion de la main en caoutchouc (Braun *et al.*, 2018, pour une revue). Sur la base de ces résultats expérimentaux, le sentiment d'appartenance a d'abord été pris en compte par les processus ascendants liés à l'apprentissage perceptuel bayésien des corrélations d'afférence multisensorielles, y compris les corrélations spatio-temporelles entre stimulations visuelles et tactiles (Armel. & Ramachandran, 2003). Selon leur théorie de l'apprentissage perceptuel bayésien, Armel et Ramachandran (2003) soutiennent que la corrélation visuo-tactile est à la fois nécessaire et suffisante pour induire l'illusion de la main en caoutchouc. Tout objet peut être vécu comme faisant partie du corps, tant que les informations visuelles et tactiles provenant de cet objet sont en corrélation spatio-temporelle. Ces informations peuvent ainsi être interprétées comme ayant une cause commune. Pour étayer leur théorie, Armel et Ramachandran (2003) ont mené une étude adaptée du paradigme de l'illusion de la main en caoutchouc. Dans cette adaptation, la main en caoutchouc, ou seulement une table à ce même emplacement, était caressée de manière synchrone ou asynchrone au frottement de la main réelle cachée du participant. En 2010, Tsakiris (2010) a proposé un modèle neurocognitif du sentiment illusoire d'appartenance comme étant la conséquence de l'interaction entre les entrées multi-sensorielles et des modèles internes du corps. En effet, des résultats ont suggéré l'existence d'un processus descendant comprenant un ou plusieurs comparateurs qui évaluent l'adéquation entre l'information sensorielle afférente et le modèle corporel interne préexistant (Tsakiris & Haggard, 2005 ; Tsakiris, 2010). Seul un appariement résultant du comparateur donnera une sensation d'appartenance et de délocalisation.

Sur la base du modèle de Tsakiris (2010), des propositions de Kalckert et Ehrsson (2012, 2014), et du modèle comparateur de l'action (Kawato *et al.*, 1999 ; Wolpert *et al.*, 1995), nous proposons une explication des différentes manifestations du sentiment d'agentivité telles que nous les avons observées dans notre étude. Le sentiment d'agentivité n'est pas unitaire et se compose de plusieurs dimensions (Braun *et al.*, 2018 ; David *et al.*, 2010). Lors de l'expérience utilisant une manipulation visuo-tactile, le sentiment d'agentivité sur le robot se produit avec

un changement de localisation et d'appartenance du corps, de manière comparable à l'agentivité du corps (*body agency*) décrite par Kalckert & Ehrsson (Kalckert & Ehrsson, 2012, 2014). D'après le modèle neurocognitif de Tsakiris et les observations de Kalckert, nous suggérons que ce sentiment d'agentivité du corps généré par stimulations sensorielles passives s'appuie sur un processus autogénéré et implicite qui donne aussi des sensations illusoires d'appartenance et de localisation. En revanche, l'autre niveau d'agentivité, généré par des mouvements volontaires du sujet, se réfère à un traitement intentionnel de haut niveau impliquant une commande motrice et une copie sensorielle prédictive de l'action. Un tel sentiment d'agentivité se produit lorsque la copie sensorielle prédictive de la commande motrice correspond à la rétroaction sensorielle qui soutient le sentiment d'agentivité envers le corps robotique.

### **De la perception de soi, en tant que robot, à la perception d'autrui, un robot**

Face à lui-même en tant que robot, médié par le miroir, ou face à autrui, en l'occurrence un robot, sont deux situations différentes dont l'une agit sur la représentation de soi et l'autre est apparentée à une interaction sociale, si on considère ici le robot comme un quasi-sujet. En immersion dans le robot, le sentiment illusoire d'incorporation est en règle générale significativement facilité car le sujet se perçoit comme robot, en perspective en première personne, ce qui est déterminant pour induire un fort sentiment d'incorporation (Toet, 2020). De la comparaison face à lui-même et face à autrui, il ressort que, face à lui-même en tant que robot, le sujet a le sentiment d'être à la place du robot –comme observé dans les expériences d'illusion du corps entier (par exemple, Petkova & Ehrsson, 2008)– principalement lorsque cela est généré par mouvements de tête. Par contre, la sensation illusoire de contrôler le robot reste intacte lorsqu'il y a mouvement volontaire du sujet, indépendamment de la perspective d'interaction, face-à-lui-même ou face-à-face. La perception Soi-Autrui dans le face-à-face entre sujet et robot pourrait être mis en regard avec le développement de la représentation de soi chez l'enfant qui se construit notamment lors d'actions partagées, imitant l'autre pour devenir soi (Riva, 2018). Lorsque face à lui le sujet perçoit le robot accomplir un même mouvement de tête, les deux têtes accomplissent comme une action à deux : le sujet peut avoir l'impression que ses intentions sont partagées avec celles du robot. Ces résultats pourraient être mis en regard de ce que Merleau-Ponty a écrit sur la perception d'autrui :

---

« Dans la perception d'autrui, mon corps et le corps d'autrui sont mis en couple, accomplissent comme une action à deux : cette conduite que je vois seulement, je la vis en quelque sorte à distance, je la fais mienne, je la reprends ou la comprends. Et réciproquement, je sais que les gestes que j'exécute moi-même pourraient être objet d'intention pour autrui. C'est le transfert de mes intentions dans le corps d'autrui, et des intentions d'autrui dans mon propre corps, cette aliénation d'autrui par moi et de moi par autrui qui rend possible la perception d'autrui. (ibid, M-P, 1967, p. 24) » cité dans Dominey, P.F. & Pointeau, G., (2016).

---

Dans ce contexte, la suite de la discussion va s'étendre au concept de la perception du corps d'autrui et son influence sur la représentation du soi corporel.

## **2. Représentation de Soi, cognition sociale et acceptabilité des robots**

Un certain nombre de paradigmes utilisant des manipulations corporelles incluant l'illusion de la main en caoutchouc (Botvinik & Cohen, 1998 ; Botvinik, 2004), les expériences hors du corps (Pektova *et al.*, 2008 ; Lenggenhager *et al.*, 2007), et la stimulation multimodale entre individus (Paladino *et al.*, 2010 ; Tajadura-Jiménez *et al.*, 2012 ; etc.) ont permis d'explorer les fondements cognitifs de la représentation du soi corporel, isolé et en interaction avec autrui, et sa plasticité. L'approche incarnée de la cognition sociale suggère que la façon dont nous percevons le corps d'autrui par rapport à notre propre corps joue un rôle crucial dans le traitement sociocognitif (Serino *et al.*, 2009). La perception des états corporels d'autrui peut activer des états similaires du soi corporel, ce qui implique que les représentations de notre propre corps et celles d'autrui peuvent partiellement se chevaucher. Cela suggère que ces représentations partagées du corps forment la base fondamentale de l'empathie, de notre compréhension des émotions et des actions des autres. Les recherches récentes en cognition sociale montrent ainsi un continuum entre la représentation de soi, l'individu avec lui-même, et celle de soi avec autrui, (Slater *et al.*, 2010 ; Maister *et al.*, 2009 ; Romano *et al.*, 2014, Serino *et al.*, 2009, Keysers *et al.*, 2009). Maister et ses collaborateurs (2009) ont suggéré qu'une telle résonance corporelle – « *such a bodily resonance* » – peut permettre une compréhension singulière et en première personne des expériences d'autrui et se situe au cœur des processus sociaux. Les marqueurs sociaux, reflets de cette résonance, sont la sympathie, la ressemblance,

l'empathie et la compréhension de l'action chez l'autre, parmi bien d'autres caractéristiques comportementales sociales.

### **Rôle de l'agentivité dans l'interaction sociale**

En manipulant l'information visuo-motrice congruente, il a été possible d'influer sur la représentation du soi corporel et la perception émotionnelle d'un sujet humain envers un robot. En effet, quand le sujet et le robot, se faisant face à travers un miroir, réalisaient des mouvements synchrones de la tête, le sujet humain a jugé le robot dans lequel il a été téléporté significativement socialement plus proche. Les conditions de contrôle dans lesquelles les mouvements de tête sujet-robot étaient asynchrones ou sans mouvement ont conduit à une diminution de l'attractivité sociale des robots, ceux-ci pouvant même être jugés comme étant moins sympathiques après immersion dans le robot par téléprésence. Les sentiments affectifs et sociaux éprouvés envers le robot étaient d'autant plus forts que le sujet avait une forte sensation de contrôler le robot. Lors de manipulations visuo-motrices congruentes en situation de face à face, des sentiments sociaux positifs, en l'occurrence une plus grande affinité, étaient néanmoins observés avec une variabilité plus importante.

Pourquoi seule l'incorporation « active » induite par la manipulation sensorimotrice en téléprésence robotique produit-elle un tel changement bénéfique dans l'attraction sociale envers les robots, quelle que soit leur apparence, humanoïde ou non-humoïde ? L'observation d'un lien entre le sentiment d'agentivité et les marqueurs de cognition sociale, la sympathie et l'affinité, est cohérente avec la suggestion de Synofzik et ses collaborateurs (2008) qu'il existe des liens cognitifs entre l'agentivité et les processus de croyance, en référence à des domaines métacognitifs. En effet, le sentiment d'agentivité explicite est une attribution causale consciente d'une action à un agent particulier. Ce processus de haut niveau, qui peut se verbaliser, s'appuie sur le niveau implicite du sentiment d'agentivité mais inclut d'autres indices telles que les informations contextuelles, les croyances préalables, etc. Sur la base de nos résultats, il semble que, ni l'occurrence, ni les scores d'incorporation en soi, ne soient suffisants pour induire un bénéfice social mais que l'indice déterminant qui induit des changements sociaux réside notamment dans la causalité intentionnelle de la phénoménologie de l'expérience d'incorporation. La commande intentionnelle des mouvements simultanés est cruciale pour produire un changement dans le sentiment social de manière concomitante avec la sensation d'incorporation dans le robot. Cet argument est appuyé par le concept du système de neurones

miroirs qui met en œuvre un mécanisme de résonance dans le cerveau du primate, permettant d'établir des représentations d'action partagée entre les agents en interaction. L'existence de neurones miroirs a d'abord été décrite dans le cortex prémoteur et pariétal du cerveau du singe (Rizzolati *et al.*, 2004). Les auteurs ont démontré que les neurones visuo-moteurs pouvaient décharger pendant l'exécution d'une action ainsi que pendant l'observation d'une autre personne effectuant une action similaire (Di pellegrino *et al.*, 1992 ; Gallese *et al.*, 1996). De plus, un certain nombre d'études suggèrent une implication du système de neurones miroirs dans des fonctions d'ordre supérieur au-delà de la représentation d'action, y compris la compréhension de l'intention (Iacoboni *et al.*, 2005 ; Gallese *et al.*, 1998), l'empathie, la théorie de l'esprit (Carr *et al.*, 2003 ; Leslie *et al.*, 2003).

La situation où le sujet est non plus face à lui-même mais face à autrui, en l'occurrence un robot, s'apparente à une situation d'imitation d'actions proche de la mimique. L'imitation est une des fonctionnalités du système des neurones miroirs, apparaissant dès la naissance dans l'évolution d'un individu. Le couplage direct entre perception et action dans les cortex prémoteur/moteur et pariétal postérieur lors de l'observation de l'action est suffisant pour déclencher le mécanisme de base de l'imitation (Chiron, 1992). Decety & Sommerville (2003) ont démontré l'extension du concept de « représentations motrices partagées » à l'imitation d'action et à la reconnaissance de l'imitation. Diverses études d'imagerie cérébrale ont montré que les zones activées par la perception d'une action réalisée par autrui sont les mêmes que les zones activées par la réalisation de cette même action par soi-même. Ainsi, cette situation de « mimétisme » entre le robot et le sujet pourrait déclencher des sentiments sociaux positifs de la part du sujet vis-à-vis du robot, en l'occurrence une plus grande affinité.

Ainsi, dans nos expériences d'incorporation, lors des mouvements de tête simultanés entre sujet humain et robot, ce pourrait être l'activation du système de neurones miroirs, reflétant la résonance intentionnelle, qui serait responsable de l'induction de sentiments sociaux chez l'Homme vis-à-vis du robot, ce qui est incompatible avec une simple stimulation visuo-tactile partagée. Cette observation est vérifiée lorsque les sujets changent de perspective de la situation de téléprésence à celle de face au robot, montrant ainsi le rôle prédominant des mouvements synchrones qui sont source de résonance intentionnelle dans les deux situations. Mais, lorsque le sujet et le robot effectuent en face-à-face des mouvements synchrones, des indices autres que l'agentivité sensorimotrice pourraient être présents, le sujet s'appropriant ici la paternité de l'action d'autrui, en l'occurrence celle du robot. Cela suggère à l'instar du modèle de Synofzik (Synofzik *et al.*, 2008) que les multiples indices provenant de niveaux différents, sensorimoteur et cognitif, que Synofzik dénomme la sensation de l'agentivité et le

jugement d'agentivité, se couplent et, par intégration pondérée multifactorielle, aboutissent à une méta-représentation. Dans cette conception métacognitive du sentiment d'agentivité, le cerveau réévalue en permanence, selon le contexte, le poids et l'impact des multiples indices d'agentivité et, par inférence bayésienne, détermine la cause la plus probable de l'effet ressenti.

### **L'Affinité, marqueur sensible de la sensation d'incorporation ?**

Comme la sympathie, nous avons vu que l'affinité envers le robot était significativement améliorée en relation avec le sentiment d'incorporation, lors de mouvements synchrones en téléprésence. Toutefois, le sentiment d'affinité apparaît comme un marqueur plus sensible aux différentes situations expérimentales d'incorporation comparativement à la sympathie. Quelles sont les interprétations possibles d'une telle différence entre deux marqueurs de la cognition sociale que sont la sympathie et l'affinité ? Ainsi, alors que les scores d'incorporation sont faibles mais non nuls lors des manipulations visuo-tactiles, le sentiment d'affinité apparaît corrélé aux sensations d'incorporation, et ce, quelle que soit la perspective, en téléprésence (uniquement en condition asynchrone) ou en face-à-face (en conditions synchrone et asynchrone). Ceci n'est pas observé pour la sympathie. Sans mouvement volontaire de la part du sujet, ce sont des informations purement sensorielles, visuelles et tactiles, qui sont intégrées induisant alors une incorporation. Quand le sujet se voit en tant que robot être stimulé de manière synchrone, il s'incarne dans le robot notamment grâce à cette congruence multi-sensorielle. En revanche, quand la stimulation n'est plus synchrone ou encore, lorsque le sujet fait face au robot, c'est une interaction interindividuelle qui semble prendre place. Ainsi, indépendamment de la synchronie visuo-tactile, tout sentiment illusoire d'incorporation –reflet de la plasticité de la représentation du soi du sujet– est concomitante d'un sentiment d'affinité vis-à-vis du robot. On pourrait attribuer cette observation au continuum entre la représentation de soi et la représentation soi-autre : Lorsqu'une personne entre dans une relation interindividuelle avec une autre, elle perçoit de fait que le soi et l'autre commencent à se chevaucher par inclusion d'aspects de l'autre dans la représentation de soi. Le test Inclusion Soi-Autruï utilise le principe du chevauchement des représentations soi et robot pour quantifier l'affinité (Aron *et al.*, 1992). Il y a ici une résonance affective particulière entre soi et l'autre, on ne partage pas la connaissance abstraite du sentiment d'affinité mais on partage ce qu'on pourrait appeler la connaissance incarnée ou la connaissance dans un format corporel. Farmer & Tsakiris (2012) ont défini un soi social corporel comme première forme d'individualité où le soi est représenté comme un objet dans le monde, exposé aux perceptions des autres. Se

percevant non pas comme étant robot mais face à un robot, c'est la malléabilité « sociale » de la représentation du soi corporel qui semble ici être observée que l'on pourrait mettre en regard de la malléabilité potentielle de nos préjugés sociaux (Maister *et al.*, 2013 ; Farmer *et al.*, 2014 ; Farmer & Maister, 2017 ; Banakou *et al.*, 2016). Comme nous l'avons discuté précédemment, la résonance motrice induit aussi cette malléabilité sociale de la représentation de soi liée, à une concomitance du sentiment d'affinité envers le robot et du sentiment d'incorporation mais de manière beaucoup plus conséquente en lien avec la synchronie. Cette malléabilité sociale, corrélée à un sentiment d'incorporation de faible importance et indépendante de la synchronie, pourrait être indépendante de la stimulation. Différemment, la sympathie envers le robot ne semble pas être un marqueur de cette malléabilité « sociale » lors de processus passifs d'incorporation. Toutefois, la sympathie est notre participation aux émotions de l'autre, négative ou positive. Les modifications de ce sentiment social envers le robot ne se produisent ici que dans le contexte d'une action conjointe comme les mouvements volontaires de tête, action que l'on sait être aux cœurs de l'induction de liens sociaux.

### **L'illusion de soi sur un visage robotique ?**

Lors de manipulations sensorimotrices en téléprésence, bien que les sujets éprouvaient une sensation illusoire de délocalisation et d'agentivité, ils n'éprouvaient cependant aucune augmentation significative du sentiment d'appropriation des traits du visage, lors des mouvements de tête synchrones entre le sujet et le robot (Ventre-Dominey *et al.*, 2019). Suite à cette première étude, nous avons émis l'hypothèse que les modifications spécifiques du sentiment d'appropriation des traits du visage, comme l'ont observé Tajadura-Jiménez et ses collaborateurs (2012), pourraient être observées lors de stimulations visuo-tactiles synchrones des deux visages, du sujet et du robot. En effet, similaire au sentiment d'appartenance d'une main artificielle générée lors des expériences d'illusion de la main en caoutchouc, ce sentiment d'appropriation des traits du visage a été mis en évidence lors de manipulations sensorielles. (Tajadura-Jiménez *et al.*, 2012a, 2012b, 2014, Sforza *et al.*, 2010). Typiquement, le participant est amené à regarder le visage d'un inconnu caressé au même endroit que celui du participant. La congruence et la synchronisation des stimulations visuo-tactiles sur deux sujets se faisant face provoquent une illusion de soi sur l'autre visage (Tajadura-Jiménez *et al.*, 2012, 2014). De plus, cette identification au visage de l'autre était concomitante d'une plus grande empathie envers l'autre (Sforza *et al.*, 2010). Ma et ses collaborateurs en 2016 ont développé une technique permettant de créer l'illusion d'un visage virtuel en demandant aux participants de

contrôler les mouvements d'un visage virtuel devant eux : ils ont eu tendance à percevoir ce visage virtuel comme le leur lorsqu'il se déplaçait en synchronie avec leur vrai visage. Contrairement à notre hypothèse initiale et aux observations de la littérature sur les interactions homme-homme, nous n'avons pas observé d'effets d'incorporation des traits du visage robotique, quelles que soient la modalité d'induction, sensorielle ou motrice, et la perspective, en téléprésence ou en face-à-face. Nous pourrions ici soupçonner que les différences morphologiques (traits du visage, couleur et texture de peau) ainsi que la rigidité du visage robotique aient créé une barrière technologique freinant les capacités d'incorporation des traits robotiques dans la propre représentation corporelle des sujets. Dans ce contexte, le type de robot, humanoïde ou non-humoïde, n'a pas non plus induit de différence. En effet, la morphologie du visage des deux robots suit la topologie du visage humain mais le visage du robot *iCub* aurait pu paraître plus proche d'un visage humain tel que nous le concevons. Cette observation est conforme à l'interprétation selon laquelle la dimension humanoïde, plus ou moins variable et éloignée, n'a pas nécessairement d'incidence sur la possibilité d'incorporation et en conséquence sur l'acceptabilité (Toët, 2020).

### 3. Sensation illusoire d'Incorporation et sa mesure

#### L'apport des mesures subjectives

L'illusion d'incorporation, mesurée par l'intensité de la sensation, est observée dans les deux conditions de temporalité, synchrone et asynchrone, même si les effets sont toujours plus importants lorsque la temporalité des mouvements de tête ou des stimulation tactiles de la joue sujet-robot est synchrone. Cette illusion d'incorporation, générée soit par information sensorimotrice, soit par information purement sensorielle, est aussi observée quelle que soit la perspective expérimentale. Se voir en tant que robot ou faire face au robot, il y a toujours une sensation illusoire d'incorporation non nulle.

Dans notre expérience, l'intensité de la sensation d'incorporation est mesurée sur une échelle subjective dans un continuum entre 0 (pas de sensation) et 100 (sensation très forte) permettant de quantifier même une faible sensation. Les études antérieures (par exemple, Botvinik & Cohen, 1998 ; Longo *et al.*, 2009 ; Kalckert & Ehrsson, 2012 ; etc.) ont, de manière générale, évalué l'incorporation avec l'échelle de Likert allant de « -3 » (totalement en désaccord) à « +3 » (totalement d'accord), « 0 » indiquant l'incertitude. La différence dans les méthodes de mesure pourrait expliquer la différence entre les valeurs positives d'incorporation en condition asynchrone obtenues dans ce travail, comparativement aux valeurs nulles ou

négligées publiées dans la littérature. Cette stimulation multimodale asynchrone est généralement adoptée comme condition de contrôle dans les expériences basées sur le paradigme d'illusion de la main en caoutchouc et leurs différentes adaptations. L'hypothèse sous-jacente formulée est de considérer qu'aucun sentiment illusoire d'appartenance envers la main factice –ou autre adaptation du paradigme– ne devrait se produire en situation asynchrone car le signal d'erreur entre le modèle génératif de la représentation interne et les signaux multisensoriels perçus est trop grand pour déclencher l'illusion. Cependant, malgré la grande erreur de prédiction pour un modèle d'incorporation, la condition asynchrone ne se traduit pas toujours par un sentiment d'appartenance nettement inférieur comparativement à la condition synchrone (Toet, 2020). Cela confirme l'inférence perceptuelle basée sur la théorie du codage prédictif selon laquelle, en principe, aucun signal sensoriel n'est strictement requis, et tous les signaux sensoriels peuvent potentiellement activer l'incorporation. Cependant, certaines modalités peuvent avoir un effet plus fort (c.-à-d. un poids plus important) que d'autres, comme cela est observé pour l'intégration multisensorielle en général, lié au niveau de bruit ou qualité des signaux (Toet, 2020). Dans son article de revue, Toet (2020) en a déduit un classement des modalités selon leur poids décroissant : la perspective visuelle en première personne, la synchronie visuo-motrice/proprioception, la synchronie visuo-tactile, et la similitude visuelle.

La principale limite de notre étude réside dans les mesures subjectives/qualitatives de la sensation d'incorporation obtenues après chaque session expérimentale. Ces mesures reposent sur des tests qualitatifs et des questionnaires subjectifs. Cependant, les résultats obtenus dans les expériences successives ont été assez cohérents entre les différents robots et les comparaisons des différentes modalités d'induction et de perspective. Gonzalez-Franco et Peck (2018) ont fait une synthèse des questionnaires utilisés dans les expériences antérieures d'illusion. Ils en ont extrait un modèle de questionnaire sur le sentiment d'incorporation fondé sur vingt-cinq items ciblant les différentes composantes d'incorporation et adapté aux expériences d'immersion dans des avatars virtuels. Nous avons construit nos questionnaires en regard de ces différents questionnaires déjà publiés dans la littérature et en les adaptant à la situation expérimentale de téléprésence robotique.

Au-delà de ces mesures subjectives, il y a un enjeu important à quantifier le sentiment d'incorporation dans les corps robotisés en mesurant des variables objectives en téléprésence robotique. Cela pourrait permettre, par exemple, de pouvoir surveiller et adapter en ligne le sentiment d'incorporation dans les robots notamment lors des applications en téléprésence (Beckerle *et al.*, 2018). En effet, reliant l'interaction homme-robot à l'incorporation, le phénomène de co-adaptation a suscité un intérêt particulier en robotique. La co-adaptation est

le processus par lequel le dispositif robotique s'adapte à son opérateur/utilisateur humain tandis que l'humain s'adapte à lui. Les deux phénomènes peuvent être mesurés : les appareils peuvent régler leurs propres paramètres grâce à un étalonnage adaptatif et/ou apprentissage automatique pendant que les opérateurs amélioreraient leurs propres capacités motrices et même leur perception pour mieux le contrôler (Beckerle *et al.*, 2018).

### **Des mesures subjectives aux mesures objectives : l'espace péripersonnel entre Soi et l'Autre**

À travers ces mesures subjectives, nous avons démontré la plasticité de la représentation du soi corporel en situation de téléprésence robotique. Des études en neurosciences ont montré que les représentations du corps humain lui-même et la représentation de l'environnement à portée de main, c'est-à-dire l'espace péripersonnel, sont étroitement liées (Serino *et al.*, 2007; Coello *et al.*, 2018). Cela semble permettre une discrimination flexible entre soi et l'environnement, y compris l'adaptation lors de l'utilisation d'outils (Holmes & Spence, 2005). Au-delà d'être une représentation multisensorielle de l'espace, la représentation de l'espace péripersonnel semble également dépendre de l'activité du système moteur (par exemple, Coello *et al.*, 2008 ; Serino *et al.*, 2009). Nous avons ainsi développé des mesures objectives de grandeurs caractéristiques de la représentation de l'espace péripersonnel, en terme d'espace atteignable et de schéma interne corporel, afin d'en mesurer la plasticité, en corrélation avec des mesures subjectives d'incorporation en immersion dans le robot humanoïde *iCub*, de la taille d'un enfant. Banakou et ses collaborateurs (Banakou *et al.*, 2013) avait montré, en induisant successivement chez des participants l'illusion de posséder un corps d'enfant de quatre ans puis celui de posséder un corps d'adulte, qu'il existe des corrélations perceptives et probablement comportementales des illusions d'appartenance du corps qui s'établissent en fonction du type de corps dans lequel se produit l'incorporation. Les résultats préliminaires de l'expérience espace-pointage suggèrent effectivement, à la simple observation des mesures, qu'il y a une diminution de l'estimation en termes d'étendue de l'espace atteignable du sujet, mesuré après une tâche durant laquelle le sujet réalise des mouvements de pointage en tant que robot et voit sa main en tant que main robotique pointer des cubes disposés sur un échiquier. Cette observation est cohérente avec la morphologie du robot *iCub* apparentée à la taille d'un enfant. Le schéma corporel du sujet, qui est évalué par la mesure de la position estimée du milieu de son avant-bras comme indicateur de cette représentation, est perçu comme plus proche par le sujet après la tâche de pointage. Cette contraction de l'espace péripersonnel est

en accord avec les théories incarnées et situées de la cognition selon lesquelles les processus cognitifs dépendent du corps et de la situation dans laquelle ils se déroulent, reposant notamment sur l'interaction entre les différents systèmes sensori-moteurs (par exemple, Coello & Delevoye-Turrell, 2007). Après téléprésence robotique, les participants ont eu une perception illusoire d'incorporation de la main du robot plutôt distribuée en termes d'appartenance, de localisation et d'agentivité. De plus, il ressort que la distance de jugement d'atteignabilité par le participant est d'autant plus réduite que son sentiment d'appartenance envers la main du robot est fort. Il semblerait aussi que cette réduction de l'espace péripersonnel ressenti par le participant est corrélée à la sensation de contrôler la main du robot. Il est maintenant établi que le schéma corporel, représentation sensorimotrice du corps utilisée pour la planification et l'exécution des mouvements, est plastique car il s'étend en utilisant un outil pour atteindre des objets lointains. Des modifications de l'espace péripersonnel, représentation fonctionnelle de l'espace à notre portée, coïncide habituellement avec les changements du schéma corporel. Dans une expérience en réalité virtuelle, d'Angelo et ses collaborateurs (2018) ont suggéré que le sentiment d'agentivité envers une main virtuelle projetée dans l'espace lointain induisait une extension à la fois du schéma corporel et de l'espace péripersonnel, reproduisant des modulations plastiques similaires à celles trouvées classiquement après l'utilisation d'outils. Il a aussi suggéré que le schéma corporel et l'espace péripersonnel sont simultanément modulés lorsque les participants établissent de nouvelles associations intention-mouvements-résultats pour contrôler les événements dans l'environnement externe par leurs propres actions (d'Angelo *et al.*, 2018). En effet, ces derniers résultats ont démontré une contraction concomitante du schéma corporel et de l'espace péripersonnel des participants lorsque la main virtuelle était présentée plus près du corps que leur main réelle. Dans notre expérience espace-pointage, l'exécution d'un mouvement dans l'espace environnant en immersion dans un robot de la taille d'un enfant semble, à la simple observation des résultats, induire une réduction du schéma corporel et de l'espace péripersonnel. Cependant, il semblerait que ce n'est pas seulement le sentiment d'agentivité envers la main du robot qui est déterminant pour induire ces modulations plastiques du schéma corporel et de l'espace péripersonnel. En effet, nos résultats préliminaires semblent indiquer que la réduction de l'espace péripersonnel du participant est corrélée à la force de son sentiment d'appartenance envers la main du robot. Ces résultats sont donc prometteurs mais ils restent à confirmer sur un plus grand nombre de participants.

#### 4. L'apparence et la morphologie des robots en question

Un robot non-humanoïde comme celui utilisé dans notre étude, tel un personnage de fiction, est-il comparable à un artefact ou à un objet similaire à un corps ? Sur la base de nos résultats, nous suggérons que, même si notre robot non-humanoïde est apparu comme un personnage de fiction, il est constitué d'un buste sans bras soutenant une tête avec les yeux, le nez, et la bouche, caractéristiques correspondant à la topologie d'un visage humain. La capacité de ressentir un sentiment d'incorporation envers un robot non-humanoïde, en s'appropriant une partie du corps, ici en l'occurrence la tête, sans que la dissemblance de l'apparence n'affecte crucialement l'interaction humain-robot, est un résultat important. En effet, ce type de robots peut être plus approprié pour remplir certaines fonctions (Złotowski *et al.*, 2015).

Pouvons-nous induire l'incorporation dans n'importe quel robot non-humanoïde ? Ici, nous avons initié cette interrogation en comparant des visages de robots humanoïdes (*iCub*) et non-humanoïdes (Reeti). Dans ce contexte, nous avons observé, d'une manière générale, aucun effet lié au type de robot. Cela indique que le type de robot n'a eu que peu ou pas d'impact sur les effets observés sur les processus d'incorporation et les grandeurs associés à leur potentielle acceptabilité. Ceci est conforme à l'interprétation selon laquelle la dimension humanoïde, plus ou moins variable et éloignée, n'a pas nécessairement d'incidence sur la possibilité d'incorporation et en conséquence d'acceptabilité (Toët, 2020). L'intégration de détails anthropomorphiques mis en œuvre dans l'apparence et le comportement des robots peut favoriser l'acceptation sociale, mais seulement jusqu'à un certain point. La similitude excessive avec les humains peut, en fait, déclencher des réactions émotionnelles négatives envers les robots, phénomène nommé « vallée étrange » (Mori, 1970).

Ces questions ont déjà été soulevées lors des expériences adaptées du paradigme de l'illusion de la main en caoutchouc. De nombreuses études ont montré que le sentiment illusoire d'appartenance ne peut être induit que pour un objet en forme de main (Bertamini & O'Sullivan, 2014 ; Guterstam *et al.*, 2013 ; Tsakiris, 2010) mais quelques auteurs, utilisant des techniques de réalité virtuelle, montrent que l'objet incorporé peut être de nature très différente et pourtant induire l'illusion (par exemple, Ma & Hommel, 2015). De même, les expériences hors du corps démontrent que les sujets peuvent ressentir la sensation de posséder ou d'être localisés dans un autre corps, comme un avatar ou un mannequin, mais pas dans un corps informe (par exemple, Pektova *et al.*, 2008). Dans l'ensemble, ces auteurs démontrent que l'objet vu doit ressembler à la forme du corps pour permettre l'incorporation mais n'a pas nécessairement besoin d'être

réaliste. Il serait certainement pertinent d'étudier la limite morphologique/physique d'un robot qui empêcherait tout sentiment d'incorporation.

Concernant la composante agentivité du sentiment d'incorporation, il a été montré que le sentiment d'agentivité induit par une action dirigée vers un but ne dépend pas de la similitude ou du réalisme de la partie du corps incorporé, le sentiment d'agentivité peut même être plus grand envers les parties du corps non réalistes lorsque celles-ci procurent une meilleure sensation de contrôle (Argelaguet *et al.*, 2016). Ces observations concordent avec les propriétés physiologiques des cellules prémotrices et intrapariétales du cortex cérébral qui conduisent à la localisation rapide des membres dans l'espace (Graziano *et al.*, 2000), mais qui ne sont pas impliquées dans la reconnaissance visuelle des objets et l'analyse visuelle de scène. Ainsi la ressemblance « visuelle » aide à induire l'incorporation mais n'est pas nécessaire, les indices peuvent même être incongrus.

Étudier les processus qui induisent l'incorporation dans un robot, en lien avec les sentiments sociaux susceptibles d'être engendrés, est un outil intéressant d'investigation de la cognition humaine mais pas seulement. Ces résultats en sciences sociales et cognitives peuvent aussi influencer sur les solutions envisagées pour construire des robots sociaux. Un des grands enjeux actuels en robotique est notamment de créer des robots au comportement affectif convaincant (Aly & Tapus, 2020). En effet, les robots sont maintenant amenés à intervenir dans les espaces sociaux humains et à collaborer dans différentes tâches. Les avancées sur la communication verbale ou non verbale a permis de doter les systèmes robotiques, destinés à devenir des robots compagnons, de capacités sociales afin d'assister des personnes en déficiences physiques et/ou cognitives (Tapus *et al.*, 2007 ; Tapus & Madaric, 2008). Des robots sociaux sont notamment envisagés pour apporter une assistance sociale et cognitive dans le cadre de laquelle ils chercheront à motiver et à inciter les gens à participer à des activités thérapeutiques. Des expériences ont été menées visant à faire correspondre la personnalité d'un robot, exprimée à travers le comportement du regard robotique, à celle de ses utilisateurs. Le comportement du robot a su exprimer une personnalité extravertie ou introvertie. De plus, l'adéquation de la personnalité du robot avec celle de l'utilisateur a montré un effet positif sur la motivation de l'utilisateur à s'engager dans une tâche répétitive (Andrist *et al.*, 2015). Dans un autre registre, les progrès récents dans le traitement du langage naturel permettent aux robots d'accéder par simulation à l'expérience humaine, ce qui peut leur permettre d'entrer dans les relations sociales humaines. Par exemple, il est possible d'améliorer la qualité de vie d'une personne ou d'un groupe de personne avec un compagnon robot narratif à mémoire

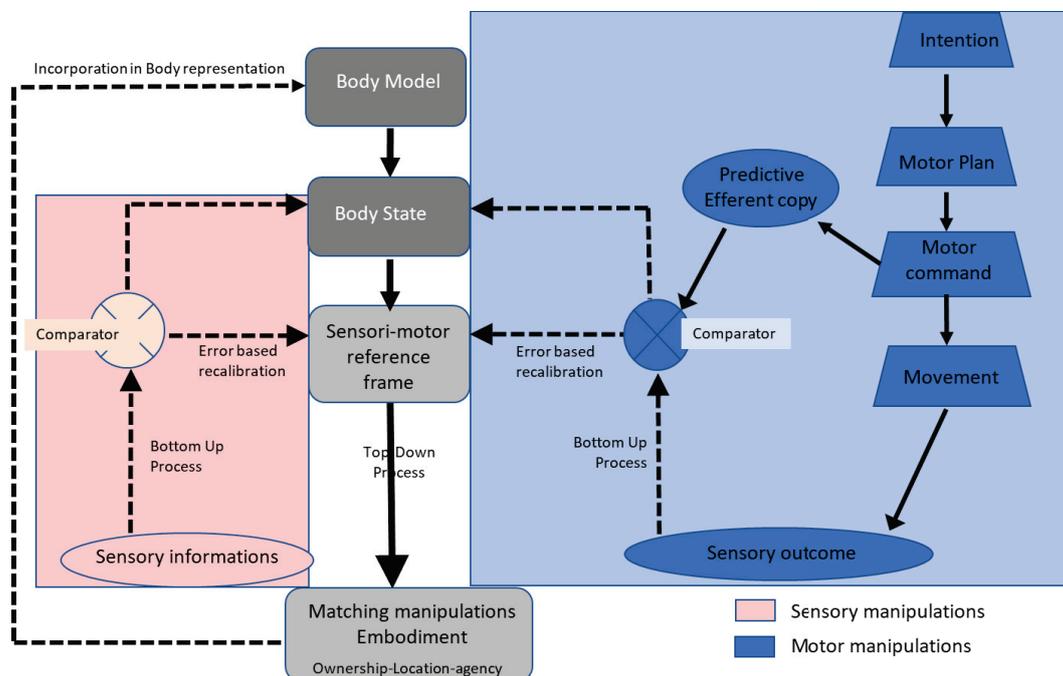
autobiographique –tel que le robot Pepper– capable d’enrichir les récits partagés par une personne (Dominey *et al.*, 2017) ou avec un groupe de personnes (Uchida *et al.*, 2021). Il devient nécessaire que les divers robots sociaux puissent adapter le contenu affectif de leur comportement généré au contexte d’interaction de l’utilisateur pour accroître la crédibilité et la pertinence que leurs intentions présumées peuvent avoir pour ces utilisateurs. Coordonner différentes modalités de communication telles que la parole, les expressions faciales et les gestes permettant d’induire des informations affectives synchronisées est une des nouvelles approches pour faire interagir le robot avec des utilisateurs humains. Ainsi, récemment, dans une étude d’interaction homme-robot, des participants ont visionné des vidéos induisant des émotions ciblées en présence du minirobot humanoïde expressif Alice (Aly & Tapus, 2020). Lors de l’interaction, celui-ci générait un comportement multimodal, adapté à la vidéo visionnée par les participants, induisant un effet positif sur la clarté du contenu émotionnel de la vidéo.

Une question reste ainsi ouverte, comment et jusqu’à quel point l’incorporation dans un environnement médié dépend-t-il de la structure, de la morphologie, de la topologie, de la taille, et de la dynamique de la représentation corporelle (Kilteni *et al.*, 2012; Ventre-Dominey *et al.*, 2019) ? Dans une adaptation de notre paradigme, une nouvelle étape en réponse à cette question serait de poursuivre cette étude avec des robots expressifs pour mieux appréhender l’appropriation des traits du visage robotique par le participant en situation de téléprésence robotique.

## 5. Synthèse et perspective

En conclusion, la comparaison des contributions motrice et tactile à la représentation de soi en situation de téléprésence robotique, illustrée dans la Figure 7-1, a mis en évidence, au-delà de la plasticité de cette représentation, que le sentiment d’agentivité n’est pas unitaire impliquant deux types de processus d’incorporation. Mis en situation d’agir et de se voir agir en tant que robot, au même instant et en dehors de leurs limites corporelles, les participants se sont incarnés fortement et singulièrement en robot actif, ayant le sentiment de contrôler les mouvements de tête de ce dernier. Deux mécanismes d’incorporation semblent être mis en jeu : l’un, lié à une commande motrice intentionnelle déclenché lors des interactions visuo-motrices et responsable de l’action volontaire externe, et l’autre, déclenché par une manipulation visuo-tactile, en situation passive, responsable à la fois du sentiment illusoire d’agentivité corporelle,

d'appartenance, et de localisation du corps. Ces derniers sont vraisemblablement sous-tendus par un mécanisme cognitif similaire. Cette commande intentionnelle de mouvements simultanés semble déterminante pour produire un changement dans les sentiments sociaux envers le robot, et ce, de manière concomitante avec l'émergence de la sensation d'incorporation dans le robot. Ainsi, l'activation du système de neurones miroirs, reflétant la résonance intentionnelle pendant les mouvements de tête simultanés entre un sujet humain et un robot, semble être une condition nécessaire à l'induction de sentiments sociaux chez l'Homme vis-à-vis du robot, conduisant à une plus grande acceptabilité de celui-ci. Les sujets mis en situation d'agir et de voir un robot, face à eux, agir pareillement au même instant se sont aussi incarnés fortement et singulièrement en robot actif, ayant le sentiment de contrôler les mouvements de tête du robot. Cette « mise de soi dans autrui ou plutôt d'autrui en soi » (Wallon, 1970) influence les sentiments sociaux du sujet envers le robot. Cette situation en quelque sorte de mimétisme, où là aussi la résonance motrice générée par les neurones miroir est en partie impliquée, révèle la malléabilité de la représentation du « soi social » corporel. Dans cette interaction active entre le sujet et le robot telle une résonance perceptive, la perception du quasi-sujet robot en action influence la perception de soi du sujet.



**Figure 7-1 : Représentation schématique de la comparaison des contributions motrice et tactile à la sensation d'incorporation.**

Une des perspectives de ce travail serait de déterminer de quelle manière la téléprésence robotique influe sur les représentations spatiales du sujet, incluant l'espace péripersonnel des

actions dirigées vers un but et l'espace extra-personnel des interactions sociales. La caractéristique principale du schéma corporel d'être hautement plastique est étroitement imbriquée avec une représentation fonctionnelle de l'espace péripersonnel. Celui-ci est fortement modulé par la manipulation d'outils. Dans l'expérience préliminaire espace-pointage présentée, nous avons émis l'hypothèse selon laquelle le schéma corporel et l'étendue de l'espace péripersonnel devraient se contracter lors d'une immersion du sujet dans un robot en action, de la taille d'un enfant. De quelle manière le schéma corporel et l'espace péripersonnel dépendent-ils de l'expérience de contrôler le cours des événements dans l'espace par ses propres actions ? Bien que la relation entre le sentiment d'appartenance du corps et le sentiment d'agentivité ait été largement abordée, peu d'études ont examiné l'occurrence et la manière dont le schéma corporel et l'espace péripersonnel peuvent s'adapter lorsque nous contrôlons les événements extérieurs par notre propre action. Après la passation de l'expérience espaces-pointage avec une vingtaine de participants, deux autres modalités expérimentales basées sur le même paradigme pourraient être expérimentées. Dans l'une, le participant devra seulement balayer du regard l'environnement visuel qu'il perçoit par téléprésence pendant que le robot pointe, et, dans l'autre, il devra, en plus, imaginer par imagerie motrice qu'il réalise les mêmes mouvements de pointage que le robot. Ainsi, la distinction entre intention et action pourrait permettre de mieux appréhender le rôle de la copie efférente produite lors de la planification d'une action et ses conséquences sur le schéma corporel et l'espace péripersonnel perçus, en lien avec la sensation d'incorporation induite par téléprésence.

Il serait aussi intéressant, d'un point de vue des concepts sur la représentation du soi mais aussi en vue d'applications potentielles thérapeutique ou sociale dans l'usage des robots, d'associer, en situation de téléprésence robotique, les mesures subjectives d'incorporation à des mesures objectives en temps réel. Un marqueur lié au déclenchement sensoriel de l'incorporation pourrait être élaboré en réalisant des mesures quantitatives lors d'une tâche de congruence intermodale (Kopft *et al.*, 2011). Plus le sujet se sentira incorporé dans le robot, plus les interactions visuo-tactiles auront lieu et plus l'effet de congruence intermodal augmentera. Un second marqueur dédié au déclenchement de l'incorporation par commande visuo-motrice consisterait à mesurer la cinématique de mouvements dirigés vers un but, effectués en parallèle dans l'espace péripersonnel du robot et du sujet. Le résultat attendu est une corrélation entre ces mesures objectives et le degré d'incorporation.

Étudier les conséquences de l'incorporation sur l'acceptation sociale du robot et de sa neurophysiologie sous-jacente reste un challenge. Poursuivre sur la question de l'induction d'une nouvelle identité personnelle par l'appropriation progressive des traits du visage est

d'importance. En effet, l'illusion de s'approprier les traits du visage d'autrui a des implications sociales car elle perturbe la frontière entre soi et autrui. En incluant dans notre paradigme, une adaptation de la tâche élaborée par Sforza et ses collaborateurs (2010) basée sur des photos de visage transformées, associant le visage du sujet et le visage du robot selon différents degrés, et un test d'association implicite, mesurant les perceptions non conscientes et déterminant comment les sujets réagissent réellement aux indices de groupe sociaux (raciaux, politiques, etc.), permettraient de mesurer et de corrélérer de nombreux indices liés à l'apparence et à la morphologie des robots.

Une dernière perspective sur le sentiment d'incorporation induit par téléprésence robotique serait de mesurer l'activité des structures neuronales impliquées dans les aspects précédemment évoqués de la représentation sensorimotrice de soi, de l'espace, et des interactions sociales, incluant les cortex préfrontal et temporo-pariétal, et les structures corticales médianes. Le réseau neuronal impliqué lors de la téléportation virtuelle du sujet dans un autre corps situé dans un environnement séparé reste méconnu. L'idée ici serait notamment d'introduire un dispositif d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle et un casque de réalité virtuelle non-magnétique compatible avec ce dispositif. Ce couplage permettrait l'immersion dans l'environnement du robot, en parallèle de mesures de l'activité neurale dans les zones d'intérêt. Une augmentation de cette activité, notamment dans le cortex temporo-pariétal, pourrait être observée et corrélée avec le degré d'incorporation.

Ce travail et ces perspectives montrent la richesse des recherches couplant neurosciences cognitives et robotique qui contribuent à la compréhension des mécanismes neurocognitifs chez l'homme et qui, en parallèle, permettent les améliorations et optimisations technologiques des robots dans le contexte des interactions avec l'homme.



## BIBLIOGRAPHIE

- Aarts, H., Custers, R., & Wegner, D. M. (2005). On the inference of personal authorship: enhancing experienced agency by priming effect information. *Conscious. Cogn.* 14, 439–458.
- Ainley, V., Apps, M. A., Fotopoulou, A., & Tsakiris, M. (2016). 'Bodily precision': a predictive coding account of individual differences in interoceptive accuracy. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 371(1708), 20160003. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0003>.
- Alimardani, M., Nishio, S., & Ishiguro, H. (2013). Humanlike robot hands controlled by brain activity arouse illusion of ownership in operators. *Scientific reports*, 3, 2396. <https://doi.org/10.1038/srep02396>.
- Alimardani, M., Nishio, S. & Ishiguro, H. (2016). Removal of proprioception by BCI raises a stronger body ownership illusion in control of a humanlike robot. *Sci Rep* 6, 33514, <https://doi.org/10.1038/srep33514>.
- Andrist, S., Mutlu, B., & Tapus, A. (2015). Look like me: matching robot personality via gaze to increase motivation. *In Proceedings of the 33rd annual ACM conference on human factors in computing systems*, 3603-3612.
- Apps, M. A. J., & Tsakiris, M. (2014). The free energy self: a predictive coding account of self-recognition. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 41, 85–97.
- Argelaguet F., Hoyet L., Trico M., Lecuyer, A. (2016). The role of interaction in virtual embodiment: Effects of the virtual hand representation. *IEEE Virtual Reality (VR)*, 3–10, doi: 10.1109/VR.2016.7504682.
- Armel, K. C., & Ramachandran, V. S. (2003). Projecting sensations to external objects: evidence from skin conductance response. *Proc.R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 270, 1499–1506.
- Aron, A., Aron, E. N., Tudor, M., & Nelson, G. (1991). Close relationships as including other in the self. *Journal of Personality and Social Psychology*, 60(2), 241-253.

- Aron, A., Aron, E. N., & Smollan, D. (1992). Inclusion of other in the self-scale and the structure of interpersonal closeness. *Journal of Personality and Social Psychology*, 63(4), 596–612.
- Aspell, J. E., Lenggenhager, B. & Blanke, O. (2009). Keeping in touch with one's self: Multisensory mechanisms of self-consciousness. *PLoS One*, 4 (8), e6488e6488.
- Austen, E. L., Soto-Faraco, S., Enns, J. T., & Kingstone, A. (2004). Mislocalizations of touch to a fake hand. *Cognitive, affective & behavioral neuroscience*, 4(2), 170–181. <https://doi.org/10.3758/cabn.4.2.170>.
- Avillac M., Deneve S., Olivier E., Pouget A., Duhamel J.R. (2005). Reference frames for representing visual and tactile locations in parietal cortex. *Nat Neurosci* 8:941–949
- Aymerich-Franch, L., & Ganesh, G. (2016). The role of functionality in the body model for self-attribution. *Neurosci. Res.* 104, 31–37.
- Aymerich-Franch, L., Petit, D., Ganesh, G., & Kheddar, A. (2015). Embodiment of a humanoid robot is preserved during partial and delayed control. In *2015 IEEE International Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO)* (Lyon), 1–5.
- Aymerich-Franch, L., Petit, D., Ganesh, G., & Kheddar, A. (2017). Non-human looking robot arms induce illusion of embodiment. *Int. J. Soc. Robot.* 9, 479–490.
- Aymerich-Franch, L., Petit, D., Ganesh, G., & Kheddar, A. (2017). Object touch by a humanoid robot avatar induces haptic sensation in the real hand. *J. Comput. Mediated Commun.* 22, 215–230.
- Baier, B., & Karnath, H. O. (2008). Tight link between our sense of limb ownership and self-awareness of actions. *Stroke*, 39(2), 486–488.
- Balconi, M. (2010). Disruption of the Sense of Agency: From Perception to Self-Knowledge. Dans M. Balconi (Ed.), *Neuropsychology of the Sense of Agency: From Consciousness to Action* (125-144). New York, NY : Springer.
- Banakou, D., Groten, R., & Slater, M. (2013). Illusory ownership of a virtual child body causes overestimation of object sizes and implicit attitude changes. *Proc.Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 110, 12846–12851.

- Barnsley, N., McAuley, J. H., Mohan, R., Dey, A., Thomas, P., & Moseley, G. L. (2011). The rubber hand illusion increases histamine reactivity in the real arm. *Current biology: CB*, *21*(23), R945–R946.
- Barrett, L. F., & Simmons, W. K. (2015). Interoceptive predictions in the brain. *Nature reviews. Neuroscience*, *16*(7), 419–429.
- Barsalou, L.W., (2010). Grounded Cognition: Past Present, and Future. *Topics in Cognitive Science*, *2*, 716–724.
- Bartolo, A., Carlier, M., Hassaini, S., Martin, Y., & Coello, Y. (2014). The perception of peripersonal space in right and left brain damage hemiplegic patients. *Frontiers in human neuroscience*, *8*, 3. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00003>.
- Bassolino, M., Serino, A., Ubaldi, S., Làdavias, E., (2010). Everyday use of the computer mouse extends peripersonal space representation. *Neuropsychologia* *48*, 803–811. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2009.11.009
- Beckerle, P., Castellini, C., & Lenggenhager, B. (2019). Robotic interfaces for cognitive psychology and embodiment research: a research roadmap. *WIREs Cognit. Sci.* *10*:e1486.
- Beckerle, P., Kõiva, R., Kirchner, E. A., Bekrater-Bodmann, R., Dosen, S., Christ, O., Abbink, D. A., Castellini, C., & Lenggenhager, B. (2018). Feel-Good Robotics: Requirements on Touch for Embodiment in Assistive Robotics. *Frontiers in neurorobotics*, *12*, 84. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2018.00084>.
- Bekrater-Bodmann, R., Foell, J., Diers, M., Kamping, S., Rance, M., Kirsch, P. & Flor, H. (2014). The importance of synchrony and temporal order of visual and tactile input for illusory limb ownership experiences. An fMRI study applying virtual reality. *PLoS One*, *9* (1), e87013.
- Bergström, I., Kilteni, K., & Slater, M. (2016). First-person perspective virtual body posture influences stress: a virtual reality body ownership study. *PLoS One* *11*: e0148060.
- Berlucchi, G., & Aglioti, S. M. (2010). The body in the brain revisited. *Experimental brain research*, *200*(1), 25–35. <https://doi.org/10.1007/s00221-009-1970-7>.
- Bermúdez, J.L. (1998). *The Paradox of Self-Consciousness*. Cambridge (Mass.): MIT Press.

- Bertamini, M., & O'Sullivan, N. (2014). The use of realistic and mechanical hands in the rubber hand illusion, and the relationship to hemispheric differences. *Consciousness and cognition*, 27, 89–99. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2014.04.010>.
- Blakemore, S. J., Wolpert, D. M. & Frith, C. D. (1998). Central cancellation of self-produced tickle sensation. *Nature Neuroscience*, 1, 635–640.
- Blakemore, S. J., Wolpert, D. & Frith, C. (2000). Why can't you tickle yourself? *Neuroreport*. 11. R11–R16.
- Blakemore, S. J., & Decety, J. (2001). From the perception of action to the understanding of intention. *Nature reviews. Neuroscience*, 2(8), 561–567.
- Blakemore, S. J., Wolpert, D. M. & Frith, C. D. (2002). Abnormalities in the awareness of action. *Trends in Cognitive Sciences*, 6, 237–242.
- Blakemore, S. J., & Sirigu, A. (2003). Prédiction d'action dans le cervelet et dans le lobe pariétal. *Recherche expérimentale sur le cerveau*, 153 (2), 239–245.
- Blakemore, S. J., Winston, J., & Frith, U. (2004). Social cognitive neuroscience: where are we heading?. *Trends in cognitive sciences*, 8(5), 216–222. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.03.012>.
- Blanke, O., & Mohr, C. (2005). Out-of-body experience, heautoscopy, and autoscopic hallucination of neurological origin Implications for neurocognitive mechanisms of corporeal awareness and self-consciousness. *Brain research. Brain research reviews*, 50(1), 184–199. <https://doi.org/10.1016/j.brainresrev.2005.05.008>.
- Blanke, O. (2012). Multisensory brain mechanisms of bodily self-consciousness. *Nature Reviews Neuroscience*, 13 (8), 556–571.
- Blanke, O., & Metzinger, T. (2009). Full-body illusions and minimal phenomenal selfhood. *Trends in cognitive sciences*, 13(1), 7–13.
- Blom, K. J., Arroyo-Palacios, J., & Slater, M. (2014). The effects of rotating the self out of the body in the full virtual body ownership illusion. *Perception* 43, 275–294.
- Bolognini, N., Casanova, D., Maravita, A. & Vallar, G. (2012). Bisecting real and fake body parts: effects of prism adaptation after right brain damage. *Front Human Neurosci* 6, 154.

- Botvinick, M., & Cohen, J. (1998). Rubber hands 'feel' touch that eyes see. *Nature*, *391*(6669), 756. <https://doi.org/10.1038/35784>.
- Bourgeois, J., Farnè, A., & Coello, Y. (2014). Costs and benefits of tool-use on the perception of reachable space. *Acta Psychologica*, *148*, 91–95.
- Braun, N., Thorne, J. D., Hildebrandt, H., & Debener, S. (2014). Interplay of agency and ownership: the intentional binding and rubber hand illusion paradigm combined. *PLoS One* *9*:e111967.
- Braun, N., Debener, S., Sychala, N., Bongartz, E., Sörös, P., Müller, H. H. O., & Philippsen, A. (2018). The senses of agency and ownership: A review. *Frontiers in Psychology*, *9*, Article 535.
- Brozzoli, C., Gentile, G., & Ehrsson, H. H. (2012). That's near my hand! Parietal and premotor coding of hand-centered space contributes to localization and self-attribution of the hand. *J. Neurosci.* *32*, 14573–14582.
- Burgess N. (2006). Spatial memory: how egocentric and allocentric combine. *Trends in cognitive sciences*, *10*(12), 551–557. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2006.10.005>.
- Buxbaum, L., & Coslett, H.B. (2001). Specialised structural descriptions for human body parts: Evidence from autotopagnosia. *Cognitive Neuropsychology*, *18*, 289 - 306.
- Capelari, E. D. P., Uribe, C., & Brasil-Neto, J. P. (2009). Feeling pain in the rubber hand: integration of visual, proprioceptive, and painful stimuli. *Perception* *38*, 92–99.
- Cardinali, L., Frassinetti F., Claudio Brozzoli C., Christian Urquizar C., Roy A. C., & Farnè (2009). A. Tool-use induces morphological updating of the body schema. *Curr Biol* *19*(12), R478–R479.
- Cardinali, L., Brozzoli, C., & Farnè, A. (2009). Peripersonal space and body schema: two labels for the same concept?. *Brain topography*, *21*(3-4), 252–260. [doi.org/10.1007/s10548-009-0092-7](https://doi.org/10.1007/s10548-009-0092-7).
- Carr, L., Iacoboni, M., Dubeau, M.-C., Mazziotta, J. C. & Lenzi, G. L. (2003). Neural mechanisms of empathy in humans: a relay from neural systems for imitation to limbic areas. *Proceedings of the national Academy of Sciences* *100*, 5497-5502.

- Carruthers, G. (2015). A metacognitive model of the feeling of agency over bodily actions. *Psychology of Consciousness: Theory, Research, and Practice*, 2(3), 210–221.
- Caspar, E. A., De Beir, A., Magalhaes De Saldanha Da Gama, P. A., Yernaux, F., Cleeremans, A., & Vanderborght, B. (2015). New frontiers in the rubber hand experiment: when a robotic hand becomes one's own. *Behav. Res. Methods* 47, 744–755.
- Cebolla, A., Miragall, M., Palomo, P., Llorens, R., Soler, J., Demarzo, M., García-Campayo, J., & Baños, R. M. (2016). Embodiment and body awareness in meditators. *Mindfulness*, 7(6), 1297–1305.
- Chiron, C., Raynaud, C., Mazière, B., Zilbovicius, M., Laflamme, L., Masure, M. C., Dulac, O., Bourguignon, M., & Syrota, A. (1992). Changes in regional cerebral blood flow during brain maturation in children and adolescents. *Journal of nuclear medicine: official publication, Society of Nuclear Medicine*, 33(5), 696–703.
- Chouteau, M. & Vievard, L., (2011) <https://www.millenaire3.com/dossiers/portrait-robot/representations-des-robots-imaginaire-ethique>.
- Clark, A. (2013). Whatever next? Predictive brains, situated agents, and the future of cognitive science. *Behav. Brain Sci.* 36, 181–204.
- Cléry, J., Guipponi, O., Wardak, C., & Ben Hamed, S. (2015). Neuronal bases of peripersonal and extrapersonal spaces, their plasticity and their dynamics: knowns and unknowns. *Neuropsychologia*, 70, 313–326. doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.10.022
- Cléry J., Guipponi O., Odouard S., Pinède S., Wardak C., & Hamed S. B. (2017). The prediction of impact of a looming stimulus onto the body is subserved by multisensory integration mechanisms. *J. Neurosci.* 37 10656–10670.
- Coello, Y., & Delevoye-Turrell, Y. (2007). Embodiment, spatial categorisation and action. *Consciousness and cognition*, 16(3), 667–683. doi.org/10.1016/j.concog.2007.07.003.
- Coello, Y., Quesque, F., Gigliotti, M. F., Ott, L., & Bruyelle, J. L. (2018). Idiosyncratic representation of peripersonal space depends on the success of one's own motor actions, but also the successful actions of others!. *PloS one*, 13(5), e0196874. <https://doi.org/10.1371>.

- Costantini, M., & Haggard, P. (2007). The rubber hand illusion: sensitivity and reference frame for body ownership. *Consciousness and Cognition*, 16(2), 229–240. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2007.01.001>.
- Costantini, M., Robinson, J., Migliorati, D., Donno, B., Ferri, F., & Northoff, G. (2016). Temporal limits on rubber hand illusion reflect individuals' temporal resolution in multisensory perception. *Cognition*, 157, 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2016.08.010>.
- Cowie, D., Makin, T. R., & Bremner, A. J. (2013). Children's responses to the rubber-hand illusion reveal dissociable pathways in body representation. *Psychological Science*, 24(5), 762–769. <https://doi.org/10.1177/0956797612462902>.
- Craig A. D. (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>.
- D'Angelo, M., di Pellegrino, G., Seriani, S., Gallina, P., and Frassinetti, F. (2018). The sense of agency shapes body schema and peripersonal space. *Sci. Rep.* 8:13847. doi: 10.1038/s41598-018-32238-z.
- Damasio, A.R. (1999). *La conscience même de soi : corps, émotion, conscience*. Paris : O. Jacob.
- Daprati, E., Sirigu, A. & Nico, D. (2010). Body and movement: consciousness in the parietal lobes. *Neuropsychologia*, 48, 756-762.
- David, N., Newen, A., & Vogeley, K. (2008). The "sense of agency" and its underlying cognitive and neural mechanisms. *Consciousness and Cognition: An International Journal*, 17(2), 523–534. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2008.03.004>.
- David, N. (2010). Functional Anatomy of the Sense of Agency: Past Evidence and Future Directions. Dans M. Balconi (Ed.), *Neuropsychology of the Sense of Agency: From Consciousness to Action*, (69-80). New York, NY : Springer.
- Decety, J., & Sommerville, J. A. (2003). Shared representations between self and other: A social cognitive neuroscience view. *Trends in Cognitive Science*, 7(12), 527-533.
- Decety, J. (2010). Mécanismes neurophysiologiques impliqués dans l'empathie et la sympathie. *Revue de neuropsychologie*, volume 2(2), 133-144. <https://doi.org/10.3917/rne.022.0133>.

- Di Pellegrino, G., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V. & Rizzolatti, G. (1992). Understanding motor events: a neurophysiological study. *Experimental brain research* **91**, 176-180.
- Dominey, P.F. & Pointeau, G., (2016). *Le corps sans limite ; Corps, « soi » et « autrui », approche en robotique expérimentale*. Presses Universitaires de Septentrion social.
- Dummer, T., Picot-Annand, A., Neal, T & Moore, C. (2009). Movement and the rubber hand illusion. *Perception* **38**, 271–280.
- Ehrsson, H. H., Spence, C., & Passingham, R. E. (2004). That's My Hand! Activity in Premotor Cortex Reflects Feeling of Ownership of a Limb. *Science*, *305*(5685), 875–877.
- Ehrsson H. H. (2007). The experimental induction of out-of-body experiences. *Science (New York, N.Y.)*, *317*(5841), 1048. <https://doi.org/10.1126/science.1142175>.
- Ehrsson, H. H., Wiech, K., Weiskopf, N., Dolan, R. J., & Passingham, R. E. (2007). Threatening a rubber hand that you feel is yours elicits a cortical anxiety response. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *104*(23), 9828–9833.
- Ehrsson, H. H., Rosén, B., Stocksélius, A., Ragnö, C., Köhler, P., & Lundborg, G. (2008). Upper limb amputees can be induced to experience a rubber hand as their own. *Brain: a journal of neurology*, *131*(Pt 12), 3443–3452. <https://doi.org/10.1093/brain/awn297v>.
- Ehrsson, H. H. (2012). The concept of body ownership and its relation to multisensory integration. In *The New Handbook of Multisensory Processes*, ed. B. E. Stein (Cambridge: MIT Press), 775–792.
- Ehrsson, H. H. (2020). Multisensory processes in body ownership. In *Multisensory Perception* (pp. 179-200). Cambridge, MA: Academic Press. doi:10.1016/B978-0-12-812492-5.00008-5.
- Farmer, H., Tajadura-Jiménez, A., & Tsakiris, M. (2012). Beyond the colour of my skin: how skin colour affects the sense of body-ownership. *Conscious. Cogn.* **21**, 1242–1256.
- Farnè, A., Pavani, F., Meneghello, F., & Làdavas, E. (2000). Left tactile extinction following visual stimulation of a rubber hand. *Brain* **123**, 2350–2360.
- 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>.

- 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. [https://doi.org/10.1016/s1053-8119\(02\)00041-1](https://doi.org/10.1016/s1053-8119(02)00041-1).
- Fink, G. R., Marshall, J. C., Halligan, P. W., Frith, C. D., Driver, J., Frackowiak, R. S., & Dolan, R. J. (1999). The neural consequences of conflict between intention and the senses. *Brain: a journal of neurology*, *122* (Pt 3), 497–512. <https://doi.org/10.1093/brain/122.3.497>.
- Fogassi, L., Gallese, V., Fadiga, L., Luppino, G., Matelli, M., & Rizzolatti, G. (1996). Coding of peripersonal space in inferior premotor cortex (area F4). *Journal of neurophysiology*, *76*(1), 141–157. <https://doi.org/10.1152/jn.1996.76.1.141Fo>
- Fourneret, P. & Jeannerod, M. (1998). Surveillance consciente limitée des performances motrices chez les sujets normaux. *Neuropsychologia*, *36* (11), 1133–1140.
- Friston K. (2010). The free-energy principle: a unified brain theory?. *Nature reviews. Neuroscience*, *11*(2), 127–138. <https://doi.org/10.1038/nrn2787>.
- Friston, K. J. (2012). The history of the future of the Bayesian brain. *Neuroimage* *62*, 1230–1233.
- Friston, K., Schwartenbeck, P., Fitzgerald, T., Moutoussis, M., Behrens, T., & Dolan, R. J. (2013). The anatomy of choice: active inference and agency. *Frontiers in human neuroscience*, *7*, 598. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00598>.
- Gallagher, S. (2000). Philosophical conceptions of the self: implications for cognitive science. *Trends Cogn. Sci.* *4*, 14–21.
- Gallagher, S. (2005). *How the Body Shapes the Mind* New York: Oxford University Press.
- Gallagher, S. & Zahavi, D. (2008). *The Phenomenological Mind. An Introduction to Philosophy of Mind and Cognitive Science*, New York, London: Routledge.
- Gallese, V., Fadiga, L., Fogassi, L. & Rizzolatti, G. (1996). Action recognition in the premotor cortex. *Brain: a journal of neurology* *119*, 593-609.
- Gallese, V., Keysers, C., & Rizzolatti, G. (2004). A unifying view of the basis of social cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, *8*(9), 396-403. Gallese V. Embodied simulation: from neurons to phenomenal experience. *Phenom. Cogn. Sci.* 2005; *4*: 23-48

- Gallotti, M., & Frith, C. D. (2013). Social cognition in the we-mode. *Trends in Cognitive Sciences*, 17(4), 160–165.
- Gentile, G., Petkova, V. I., & Ehrsson, H. H. (2011). Integration of visual and tactile signals from the hand in the human brain: An fMRI study. *Journal of Neurophysiology*, 105(2), 910–922.
- Gentile, G., Guterstam, A., Brozzoli, C., & Ehrsson, H. H. (2013). Disintegration of multisensory signals from the real hand reduces default limb self-attribution: An fMRI study. *The Journal of Neuroscience*, 33(33), 13350–13366.
- Georgieff, N. & Jeannerod, M. (1998). Beyond Consciousness of External Reality: A “Who” System for Consciousness of Action and Self-Consciousness. *Consciousness and Cognition*, 7, 465-477.
- Giummarra, M. J., Gibson, S. J., Georgiou-Karistianis, N., & Bradshaw, J. L. (2008). Mechanisms underlying embodiment, disembodiment and loss of embodiment. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 32(1), 143e160.
- Goldman A.I. (2006). *Simulating Minds. The Philosophy, Psychology and Neuroscience of Mindreading*. Oxford University Press.
- Goldman, A., & de Vignemont, F. (2009). Is social cognition embodied?. *Trends in cognitive sciences*, 13(4), 154–159.
- González-Franco, M., Pérez-Marcos, D., Spanlang, B., & Slater, M. (2010). The contribution of real-time mirror reflections of motor actions on virtual body ownership in an immersive virtual environment, in *2010 IEEE Virtual Reality Conference (VR)* (Waltham, MA: IEEE), 111–114.
- Gorisse, G., Christmann, O., Amato, E. A., & Richir, S. (2017). First- and Third-Person Perspectives in Immersive Virtual Environments: Presence and Performance Analysis of Embodied Users. *Frontiers in Robotics and AI*, 4. doi.org/10.3389/frobt.2017.00033.
- Graziano MSA, Hu XT, & Gross CG (1997). Visuospatial Properties of Ventral Premotor Cortex. *J Neurophysiol* 77: 2268–2292.
- Graziano, M. S. A., Cooke, D. F., and Taylor, C. S. R. (2000). Coding the location of the arm by sight. *Science* 290, 1782–1786. doi: 10.1126/science.290.5497.1782

- Gurwitsch, Aron. (1985). *Marginal Consciousness*. Edited by Lester Embree. *Athens: Ohio University Press*. Hintikka.
- Guterstam, A., Gentile, G., & Ehrsson, H. H. (2013). The invisible hand illusion: multisensory integration leads to the embodiment of a discrete volume of empty space. *J. Cogn. Neurosci.* 25, 1078–1099.
- Guterstam, A., Abdulkarim, Z., & Ehrsson, H. H. (2015). Illusory ownership of an invisible body reduces autonomic and subjective social anxiety responses. *Sci. Rep.* 5:9831.
- Haans, A., IJsselsteijn, W. A., & de Kort, Y. A. W. (2008). The effect of similarities in skin texture and hand shape on perceived ownership of a fake limb. *Body Image* 5, 389–394.
- Haggard, P. (2008). Human volition: towards a neuroscience of will. *Nat. Rev. Neurosci.* 9, 934–946. doi: 10.1038/nrn2497.
- Haggard, P. (2017). Sense of agency in the human brain. *Nat Rev Neurosci* 18, 196–207. <https://doi.org/10.1038/nrn.2017.14>.
- Hall, E. T. (1966). *The hidden dimension* (1st ed.). Doubleday & Co.
- Hara, M., Pozeg, P., Rognini, G., Higuchi, T., Fukuhara, K., & Yamamoto, A. (2015). Voluntary self-touch increases body ownership. *Front. Psychol.* 6:1509.
- Hara, M., Nabae, H., Yamamoto, A., & Higuchi, T. (2016). A novel rubber hand illusion paradigm-allowing active self-touch with variable force feedback controlled by a haptic device. *IEEE Trans. Hum. Mach. Syst.* 46, 78–87.
- Havlíček, O. (2016). Challenges of Investigating the Sense of Agency by explicit and implicit methods. Thesis. Munich University.
- Hayduk, L. A. (1978). Personal space: An evaluative and orienting overview. *Psychological Bulletin*, 85(1), 117–134.
- Hazem, N. (2018). Conscience de soi et contact interindividuel : études en électrophysiologie et magnétoencéphalographie. Sciences cognitives. Thèse de doctorat. Sorbonne Université, 2018.
- Head, H., & Holmes, H. G. (1911-1912). Sensory disturbances from cerebral lesions. *Brain*, 34, 102–254.

- Hecht, H., Welsch, R., Viehoff, J., & Longo, M. R. (2019). The shape of personal space. *Acta psychologica, 193*, 113–122.
- Hohwy, J. (2007). The sense of self in the phenomenology of agency and perception. *Psyche* 13, 1–20.
- Hohwy, J., & Paton, B. (2010). Explaining away the body: experiences of supernaturally caused touch and touch on non-hand objects within the rubber hand illusion. *PLoS One* 5:e9416. doi: 10.1371/journal.pone.0009416.
- Holmes, N. P., & Spence, C. (2004). The body schema and the multisensory representation(s) of peripersonal space. *Cognitive processing, 5*(2), 94–105. doi.org/10.1007/s10339-004-0013-3.
- Holmes, N. P., & Spence, C. (2005). Multisensory integration: space, time and super additivity. *Current biology: CB, 15*(18), R762–R764.
- Honma M, Koyama S, & Osada Y (2009). Double tactile sensations evoked by a single visual stimulus on a rubber hand. *Neurosci Res* 65: 307–311.
- Hornak, J., Bramham, J., Rolls, E. T., Morris, R. G., O'Doherty, J., Bullock, P. R., & Polkey, C. E. (2003). Changes in emotion after circumscribed surgical lesions of the orbitofrontal and cingulate cortices. *Brain: a journal of neurology, 126*(Pt 7), 1691–1712.
- Huang, H.-C., Lee, Y.-T., Chen, W.-Y., & Liang, C. (2017). The sense of 1PPlocation contributes to shaping the perceived self-location together with the sense of body-location. *Front. Psychol.* 8:370. doi: 10.3389/fpsyg.2017.00370
- Husserl, E. (1913). *Ideas Pertaining to a Pure Phenomenology and to a Phenomenological Philosophy — Second Book: Studies in the Phenomenology of Constitution*, trans. R. Rojcewicz and A. Schuwer, Dordrecht: Kluwer, 1989.
- Iachini, T., Coello, Y., Frassinetti, F., Ruggiero, G., (2014). Body Space in Social Interactions: A Comparison of Reaching and Comfort Distance in Immersive Virtual Reality. *PLoS ONE* 9. doi:10.1371/journal.pone.0111511.
- Iachini, T., Coello, Y., Frassinetti, F., Senese, V.P., Galante, F., Ruggiero, G., (2016). Peripersonal and interpersonal space in virtual and real environments: Effects of gender and age. *Journal of Environmental Psychology* 45, 154–164. doi:10.1016/j.jenvp.2016.01.004.

- Iacoboni, M., Molnar-Szakacs, I., Gallese, V., Buccino, G., Mazziotta, J. C., & Rizzolatti, G. (2005). Grasping the intentions of others with one's own mirror neuron system. *PLoS biology*, *3*(3), e79. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0030079>.
- Ide M. (2013). The effect of "anatomical plausibility" of hand angle on the rubber-hand illusion. *Perception*, *42*(1), 103–111. <https://doi.org/10.1068/p7322>.
- IJsselsteijn, W. A., de Kort, Y. A. W., & Haans, A. (2006). Is this my hand I see before me? The rubber hand illusion in reality, virtual reality, and mixed reality. *Presence Teleoperat. Virt. Environ.* *15*, 455–464.
- Ionta, S., Heydrich, L., Lenggenhager, B., Mouthon, M., Fornari, E., Chapuis, D. & Blanke, O. (2011). Multisensory mechanisms in temporo-parietal cortex support self-location and first-person perspective. *Neuron*, *70* (2), 363-374.
- Ionta, S., Sforza, A., Funato, M., & Blanke, O. (2013). Anatomically plausible illusory posture affects mental rotation of body parts. *Cognit. Affect. Behav. Neurosci.* *13*, 197–209.
- Iriki, A., Tanaka, M., & Iwamura, Y. (1996). Coding of modified body schema during tool use by macaque postcentral neurones. *Neuroreport*, *7*(14), 2325–2330. <https://doi.org/10.1097/00001756-199610020-00010>.
- Ishida, H., Nakajima, K., Inase, M., Murata, A., (2009). Shared Mapping of Own and Others' Bodies in Visuotactile Bimodal Area of Monkey Parietal Cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience* *22*, 83–96. doi:10.1162/jocn.2009.21185.
- Ishida, H., Suzuki, K., Grandi, L.C., (2015). Predictive coding accounts of shared representations in parieto-insular networks. *Neuropsychologia* *70*, 442–454. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2014.10.020.
- James, W. (1890). *The principles of Psychology*, Vol 1. New York: Holt.
- Jazbec, M., Nishio, S., Ishiguro, H., Kuzuoka, H., Okubo, M., & Peñaloza, C. (2017). Body-swapping experiment with an android robot: investigation of the relationship between agency and a sense of ownership toward a different body. n *2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)* (Banff, CA), 1471–1476.
- Jeannerod M. (2004). Visual and action cues contribute to the self-other distinction. *Nature neuroscience*, *7*(5), 422–423. <https://doi.org/10.1038/nm0504-422>.

- Jeannerod, M. (2006). *Motor Cognition: What Actions Tell the Self*. Oxford: Oxford University Press; 10.1093/acprof:oso/9780198569657.001.0001.
- Jeannerod, M (2009). The sense of agency and its disturbances in schizophrenia: a reappraisal. *Exp. Brain Res.* 192, 527–532.
- Jenkinson, P. M., & Preston, C. (2015). New reflections on agency and body ownership: The moving rubber hand illusion in the mirror. *Consciousness and cognition*, 33, 432–442. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2015.02.020>.
- Jimenez, J., Scully T., Barbosa N., Donner C., Alvarez X., Vieira T., Matts P., Orvalho V., Gutierrez D., & Weyrich T. (2010). A practical appearance model for dynamic facial color. *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 29, 141, 1-10. doi : <https://doi.org/10.1145/1866158.1866167>.
- Johnson Frey, SH. (2003). What’s so special about human tool use?. *Neuron* 39,:201–204.
- Kalckert, A., & Ehrsson, H. H. (2012). Moving a rubber hand that feels like your own: a dissociation of ownership and agency. *Front. Hum. Neurosci.* 6 : 40.
- Kalckert, A., & Ehrsson, H. H. (2014). The moving rubber hand illusion revisited: comparing movements and visuotactile stimulation to induce illusory ownership. *Conscious. Cogn.* 26, 117–132.
- Kalckert, A., & Ehrsson, H. H. (2014). The spatial distance rule in the moving and classical rubber hand illusions. *Conscious. Cogn.* 30, 118–132.
- Kammers, M. P., de Vignemont, F., Verhagen, L., & Dijkerman, H. C. (2009). The rubber hand illusion in action. *Neuropsychologia*, 47(1), 204-211.
- Karnath, H. O., & Baier, B. (2010). Right insula for our sense of limb ownership and self-awareness of actions. *Brain structure & function*, 214(5-6), 411–417. <https://doi.org/10.1007/s00429-010-0250-4>.
- Kawato, M. Internal models for motor control and trajectory planning. (1999). *Curr Opin Neurobiol* 9, 718-727, doi:10.1016/s0959-4388(99)00028-8.
- Keenan, J. P., Gallup, G. G., & Falk, D., Jr. (2003). *The Face in the Mirror: The Search for the Origins of Consciousness*. New York: Harper Collins.

- Keizer, A., van Elburg, A., Helms, R., & Dijkerman, H. C. (2016). A Virtual Reality Full Body Illusion Improves Body Image Disturbance in Anorexia Nervosa. *PloS one*, *11*(10), e0163921. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0163921>.
- Keysers, C., Wicker, B., Gazzola, V., Anton, J. L., Fogassi, L., & Gallese, V. (2004). A touching sight: SII/PV activation during the observation and experience of touch. *Neuron*, *42*(2), 335–346.
- Keysers, C., Gazzola, V., (2009). Expanding the mirror: vicarious activity for actions, emotions, and sensations. *Current Opinion in Neurobiology, Motor systems • Neurology of behaviour* *19*, 666–671. doi:10.1016/j.conb.2009.10.006.
- Kiltner, K., Normand, J.-M., Sanchez-Vives, M. V., & Slater, M. (2012). Extending body space in immersive virtual reality: a very long arm illusion. *PLoS One* *7*: e40867.
- Kiltner, K., Maselli, A., Kording, K. P., and Slater, M. (2015). Over my fake body: body ownership illusions for studying the multisensory basis of own-body perception. *Front. Hum. Neurosci.* *9*:141.
- Kokkinara, E., & Slater, M. (2014). Measuring the effects through time of the influence of visuomotor and visuotactile synchronous stimulation on a virtual body ownership illusion. *Perception* *43*, 43–58.
- Kokkinara, E., Slater, M., & López-Moliner, J. (2015). The effects of visuomotor calibration to the perceived space and body, through embodiment in immersive virtual reality. *ACM Trans. Appl. Percept.* *13*, 1–22.
- Krekhov, A., Cmentowski, S., & Krüger, J. (2019). The illusion of animal body ownership and its potential for virtual reality games. *arXiv preprint arXiv:1907.05220*.
- Laffleur, A., Soulières, I., & Forgeot d’Arc, B. (2016). Social Cognition and the Sense of Agency in Autism: From Action to Interaction. *Santé mentale au Québec* *41*, 163–181.
- Leder, D., (1990). *The absent body*, Chicago: Chicago University Press.
- Lenggenhager, B., Tadi, T., Metzinger, T. & Blanke, O. (2007). Video ergo sum: Manipulating bodily self-consciousness. *Science*, *317* (5841), 1096-1099.
- Lenggenhager, B. & Lopez, C. (2015). Vestibular Contributions to the Sense of Body, Self, and Others. In *T. Metzinger & J. M. Windt* (Eds).

- Leslie, K. R., Johnson-Frey, S. H. & Grafton, S. T. (2004). Functional imaging of face and hand imitation: towards a motor theory of empathy. *Neuroimage* **21**, 601-607.
- Limanowski, J., & Blankenburg, F. (2013). Minimal self-models and the free energy principle. *Front. Hum. Neurosci.* 7:547.
- Limanowski, J., Lutti, A. & Blankenburg, F. (2014). The extrastriate body area is involved in illusory limb ownership. *NeuroImage*, *86*, 514-524.
- Lipps, T. 1900. Ästhetische Einföhlung. *Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane*, *22*: 415–50.
- 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., Tsakiris, M., & Haggard, P. (2008). What is embodiment? A psychometric approach. *Cognition* *107*: 978-998.
- Longo, M. R., Kammers, M. P. M., Gomi, H., Tsakiris, M., & Haggard, P. (2009). Contraction of body representation induced by proprioceptive conflict. *Curr. Biol.* *19*, 727–728.
- Ma, K., & Hommel, B. (2013). The virtual-hand illusion: effects of impact and threat on perceived ownership and affective resonance. *Front. Psychol.* *4* : 604.
- Ma, K., & Hommel, B. (2015). The role of agency for perceived ownership in the virtual hand illusion. *Consciousness and cognition*, *36*, 277–288. [doi.org/10.1016/j.concog.2015.07.008](https://doi.org/10.1016/j.concog.2015.07.008).
- Ma, K., Sellaro, R., Lippelt, D. P., & Hommel, B. (2016). Mood migration: How enfacing a smile makes you happier. *Cognition*, *151*, 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2016.02.018>.
- Ma, K., Lippelt, D. P., & Hommel, B. (2017). Creating virtual-hand and virtual-face illusions to investigate self-representation. *J. Vis. Exp.* *121*:54784.
- Macaluso, E., & Maravita, A. (2010). The representation of space near the body through touch and vision. *Neuropsychologia*, *48*(3), 782–795.

- Maister, L., Sebanz, N., Knoblich, G., & Tsakiris, M. (2013). Experiencing ownership over a dark-skinned body reduces implicit racial bias. *Cognition* 128,
- Makin, T. R., Holmes, N. P., & Zohary, E. (2007). Is that near my hand? Multisensory representation of peripersonal space in human intraparietal sulcus. *The Journal of Neuroscience*, 27(4), 731–740.
- Makin, T. R., Holmes, N. P., & Ehrsson, H. H. (2008). On the other hand: dummy hands and peripersonal space. *Behavioural brain research*, 191(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2008.02.041>.
- Manning, L. (2016). *Le self: Normalité et pathologie*. Paris: Armand Colin.
- Maravita, A., Spence, C., & Driver, J. (2003). Multisensory integration and the body schema: close to hand and within reach. *Current biology: CB*, 13(13), 531–539.
- Maravita, A., & Iriki, A. (2004). Tools for the body (schema). *Trends in cognitive sciences*, 8(2), 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2003.12.008>
- Mori, M. (1970). The uncanny valley. *Energy*, 7(4), 33-35.
- Maselli, A., & Slater, M. (2013). The building blocks of the full body ownership illusion. *Front. Hum. Neurosci.* 7:83.
- Maselli, A. (2015). Allocentric and egocentric manipulations of the sense of self-location in full-body illusions and their relation with the sense of body ownership. *Cognitive Processing*, 16(1), 309-312.
- Mazzurega, M., Pavani, F., Paladino, M. P., & Schubert, T. W. (2011). Self-other bodily merging in the context of synchronous but arbitrary-related multisensory inputs. *Experimental Brain Research*, 213(2-3), 213–221.
- Medzhitov, R. & Janeway, C. A. (2002). Decoding the Patterns of Self and Nonself by the Innate Immune System. *Science*, 296–298.
- Merleau-Ponty M., (1945). *Phénoménologie de la perception*. Paris : Gallimard; 1945.
- Metzinger, T. (2009). *The ego tunnel: The science of the mind and the myth of the self*. Basic Books.
- Moore, J. W., Wegner, D. M., & Haggard, P. (2009). Modulating the sense of agency with external cues. *Conscious. Cogn.* 18, 1056–1064.

- Moore J. W., & Fletcher P. C. (2012). Sense of agency in health and disease: a review of cue integration approaches. *Conscious. Cogn.* 21 59–68.
- Moore, J. W., Middleton, D., Haggard, P., & Fletcher, P. C. (2012). Exploring implicit and explicit aspects of sense of agency. *Conscious. Cogn.* 21, 1748–1753.
- Moore, J. W., & Obhi, S. S. (2012). Intentional binding and the sense of agency: a review. *Conscious. Cogn.* 21, 546–561.
- Mori, M. (1970). The uncanny valley. *Energy*, 7(4), 33-35.
- Moseley, G. L., Olthof, N., Venema, A., Don, S., Wijers, & M., Gallace, A. (2008). Psychologically induced cooling of a specific body part caused by the illusory ownership of an artificial counterpart. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 105, 13169–13173.
- Mukamel, R., Ekstrom, A. D., Kaplan, J., Iacoboni, M., & Fried, I. (2010). Single-neuron responses in humans during execution and observation of actions. *Current biology: CB*, 20(8), 750–756.
- Nishio, S., Watanabe, T., Ogawa, K., & Ishiguro, H. (2012). Body ownership transfer to teleoperated android robot. *Social Robotics. ICSR 2012*, eds S. S. Ge, O. Khatib, J. J. Cabibihan, R. Simmons, and M. A. Williams (Berlin; Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg), 398-407.
- Nots C., 2013. *Le Soi et Le Self, Publibook des écrivains*.
- O’Shaughnessy, B. (1980). *The Will*. Volume 1. Cambridge: Cambridge University Press.
- Paillard, J. (1999). Body schema and body image: a double dissociation in deafferented patients. In G.N. Gantchev, S. Mori, & J. Massion (Eds), *Motor control, today and tomorrow*, 197-214.
- Paladino, M.-P., Mazzurega, M., Pavani, F., & Schubert, T. W. (2010). Synchronous multisensory stimulation blurs self-other boundaries. *Psychological Science*, 21(9), 1202–1207.
- Pavani, F., Spence, C., & Driver, J. (2000). Visual capture of touch: out-of-the-body experiences with rubber gloves. *Psychological science*, 11(5), 353–359. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00270>.

- Pavani, F., & Zampini, M. (2007). The role of hand size in the fake-hand illusion paradigm. *Perception, 36*(10), 1547–1554. <https://doi.org/10.1068/p5853>.
- Peck, T. C., Seinfeld, S., Aglioti, S. M., & Slater, M. (2013). Putting yourself in the skin of a black avatar reduces implicit racial bias. *Conscious. Cogn. 22*, 779–787.
- Penfield, W., & Rasmussen, T. (1950). *The Cerebral Cortex of Man*. New York: MacMillan.
- Petkova, V. I., & Ehrsson, H. H. (2008). If I were you: perceptual illusion of body swapping. *PloS One, 3*(12), e3832. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0003832>.
- Petkova, V. I., Bjornsdotter, M., Gentile, G., Jonsson, T., Li, T. Q. & Ehrsson, H. H. (2011). From part- to whole-body ownership in the multisensory brain. *Current Biology, 21* (13), 1118-1122.
- Petkova, V. I., Khoshnevis, M., & Ehrsson, H. H. (2011). The perspective matters! Multisensory integration in egocentric reference frames determines full-body ownership. *Frontiers in psychology, 2*, 35. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00035>.
- Pfeiffer, C., Lopez, C., Schmutz, V., Duenas, J. A., Martuzzi, R. & Blanke, O. (2013). Multisensory origin of the subjective first-person perspective: Visual, tactile, and vestibular mechanisms. *PLoS One, 8* (4), e61751e61751.
- Pia, L., Garbarini, F., Fossataro, C., Burin, D., & Berti, A. (2016). Sensing the body, representing the body: evidence from a neurologically based delusion of body ownership. *Cogn. Neuropsychol. 33*, 112–119.
- Pichiorri, F., Morone, G., Petti, M., Toppi, J., Pisotta, I., & Molinari, M. (2015). Brain-computer interface boosts motor imagery practice during stroke recovery. *Ann. Neurol. 77*, 851–865.
- Pozeg, P., Galli, G., & Blanke, O. (2015). Those are your legs: the effect of visuo-spatial viewpoint on visuo-tactile integration and body ownership. *Front. Psychol. 6*:1749.
- Press, C., Heyes, C., Haggard, P., & Eimer, M. (2008). Visuotactile learning and body representation: an ERP study with rubber hands and rubber objects. *Journal of cognitive neuroscience, 20*(2), 312–323. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.20022>.

- Preston, C., Kuper-Smith, B. & Ehrsson, H. (2015). Owning the body in the mirror: The effect of visual perspective and mirror view on the full-body illusion. *Sci Rep* **5**, 18345. <https://doi.org/10.1038/srep18345>.
- Price, B. H., Daffner, K. R., Stowe, R. M., & Mesulam, M. M. (1990). The comportsmental learning disabilities of early frontal lobe damage. *Brain: a journal of neurology*, *113* (Pt 5), 1383–1393.
- Quesque F., (2015). Montre-moi comment tu bouges, je te dirai à quoi tu penses : vers une approche incarnée de la cognition sociale. Philosophie. Thèse de doctorat. Université Charles de Gaulle - Lille III.
- Quesque, F., Ruggiero, G., Mouta, S., Santos, J., Iachini, T., Coello, Y., (2016). Keeping you at arm's length: modifying peripersonal space influences interpersonal distance. *Psychological Research* 1–12. doi:10.1007/s00426-016-0782-1
- Raz, L., Weiss, P. L., & Reiner, M. (2008). The virtual hand illusion and body ownership. *EuroHaptics 2008*, ed M. Ferre (Berlin; Heidelberg: Springer), 367–372.
- Riva, G. (2014). Out of my real body: Cognitive neuroscience meets eating disorders. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*, 236. [http:// dx.doi.org/10.3389/fnhum.2014.00236](http://dx.doi.org/10.3389/fnhum.2014.00236)
- Riva, G. (2018). The neuroscience of body memory: From the self through the space to the others. *Cortex: A Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, *104*, 241–260.
- Rizzolatti, G., Scandolara, C., Matelli, M., & Gentilucci, M. (1981). Afferent properties of periarculate neurons in macaque monkeys. I. Somatosensory responses. *Behav. Brain Res.* *2*, 125–146.
- Rizzolatti, G., Matelli, M., & Pavesi, G. (1983). Deficits in attention and movement following the removal of postarcuate (area 6) and prearcuate (area 8) cortex in macaque monkeys. *Brain: a journal of neurology*, *106* (Pt 3), 655–673.
- Rizzolatti, G. & Craighero, L. (2004). The mirror-neuron system. *Annu. Rev. Neurosci.* **27**, 169-192.
- Rizzolatti, G., Fogassi L., Gallese, V., (2007). Les neurones miroirs. *Pour la science*, *351*, p. 44-49.

- Rizzolatti, G., & Sinigaglia, C. (2008). *Mirrors in the brain: How our minds share actions and emotions*. (F. Anderson, Trans.). Oxford University Press.
- Rochat, P. (2010). The innate sense of the body develops to become a public affair by 2-3 years. *Neuropsychologia*, *48*(3), 738-745.
- Rochat, P. (2012). Primordial sense of embodied self-unity. In V. Slaughter, & C. Brownell (Eds.), *Early development of body representations* (p. 3-18). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Rognini, G., Sengül, A., Aspell, J. E., Salomon, R., Bleuler, H., & Blanke, O. (2013). Visuo-tactile integration and body ownership during self-generated action. *Eur.J. Neurosci.* *37*, 1120–1129.
- Rohde, M., Di Luca, M., & Ernst, M. O. (2011). The rubber hand illusion: feeling of ownership and proprioceptive drift do not go hand in hand. *PLoS One* *6*:e21659.
- Romano, D., Caffa, E., Hernandez-Arieta, A., Brugger, P., & Maravita, A. (2014). The robot hand illusion: inducing proprioceptive drift through visuo-motor congruency. *Neuropsychologia* *70*, 414–420.
- Saito N., Takahata K., Murai T., & Takahashi H. (2015). Discrepancy between explicit judgement of agency and implicit feeling of agency: Implications for sense of agency and its disorders. *Consciousness and Cognition*. *37*: 1–7.
- Samad, M., Chung, A. J., & Shams, L. (2015). Perception of body ownership is driven by Bayesian sensory inference. *PLoS One* *10*:e0117178.
- Sanchez-Vives, M. V., Spanlang, B., Frisoli, A., Bergamasco, M., & Slater, M. (2010). Virtual hand illusion induced by visuomotor correlations. *PLoS One* *5*:e10381. doi: 10.1371/journal.pone.0010381.
- Schaefer, M., Heinze, H.-J., & Rotte, M. (2009). My third arm: Shifts in topography of the somatosensory homunculus predict feeling of an artificial supernumerary arm. *Hum. Brain Mapp.* *30*, 1413–1420.
- Schaefer, M., Konczak, F., Heinze, H. J., & Rotte, M. (2013). Referral of touch and ownership between the hands and the role of the somatosensory cortices. *PloS One*, *8*(1), e52768. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0052768>.

- Serino, A., Alsmith, A., Costantini, M., Mandrigin, A., Tajadura-Jiménez, A., & Lopez, C. (2013). Bodily ownership and self-location: components of bodily self-consciousness. *Consciousness and cognition*, 22(4), 1239–1252.
- Serino, A., Noel, J.-P., Galli, G., Canzoneri, E., Marmaroli, P., Lissek, H., Blanke, O., (2015). Body part-centered and full body-centered peripersonal space representations. *Scientific Reports* 5. doi:10.1038/srep18603
- Seth, A. K. (2013). Interoceptive inference, emotion, and the embodied self. *Trends Cogn. Sci.* 17, 565–573.
- Sforza, A., Bufalari, I., Haggard, P., & Aglioti, S. M. (2010). My face in yours: visuo-tactile facial stimulation influences sense of identity. *Soc. Neurosci.* 5, 148–162.
- Shallice, T. (1988). *From neuropsychology to mental structure*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511526817>
- Shamay-Tsoory, SG, Tomer, R, & Berger, BD, (2005). Impaired affective theory of mind is associated with right ventromedial prefrontal damage. *J Cogn Neurosci*; 15: 1-14.
- Shamay-Tsoory, SG, Aharon-Peretz, J., & Perry, D. (2009). Two systems for empathy: a double dissociation between emotional and cognitive empathy in inferior frontal gyrus versus ventromedial prefrontal lesions. *Brain*; 132: 617-27.
- Shilling, C. (2012). *The body & social theory*. London: SAGE.
- 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>.
- Singer, T., Seymour, B., O'Doherty, J., Kaube, H., Dolan, R. J., & Frith, C. D. (2004). Empathy for pain involves the affective but not sensory components of pain. *Science (New York, N.Y.)*, 303(5661), 1157–1162.
- Sirigu, A., Grafman, J., Bressler, K., & Sunderland, T. (1991). Multiple representations contribute to body knowledge processing. Evidence from a case of autotopagnosia. *Brain*. 114, 629-642.

- Slater, M., Perez-Marcos, D., Ehrsson, H. H., & Sanchez-Vives, M. V. (2008). Towards a digital body: the virtual arm illusion. *Front. Hum. Neurosci.* 2:6. doi: 10.3389/neuro.09.006.2008.
- Slater, M., Perez-Marcos, D., Ehrsson, H. H., & Sanchez-Vives, M. V. (2009). Inducing illusory ownership of a virtual body. *Front. Neurosci.* 3, 214–220.
- Slater, M., Spanlang, B., Sanchez-Vives, M. V., & Blanke, O. (2010). First person experience of body transfer in virtual reality. *PLoS One* 5:e10564. doi: 10.1371/journal.pone.0010564.
- Slaughter, V., & Brownell, C. (2012). *Early development of body representations*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Sposito, A. V., Bolognini, N., Vallar, G., Posteraro, L. & Maravita, A. (2010). The spatial encoding of body parts in patients with neglect and neurologically unimpaired participants. *Neuropsychologia* 48(1), 334–340.
- Stephens, W., Steed, A., & Slater, M. (2013). Human tails: ownership and control of extended humanoid avatars. *IEEE Trans. Vis. Computer Graph.* 4, 583–590.
- Synofzik, M., Vosgerau, G., & Newen, A. (2008). Beyond the comparator model: a multifactorial two-step account of agency. *Conscious. Cogn.* 17, 219–239.
- Synofzik, M., Vosgerau, G., & Newen, A. (2008). I move, therefore I am: a new theoretical framework to investigate agency and ownership. *Conscious. Cogn.* 17, 411–424.
- Tajadura-Jiménez, A., Grehl, S., & Tsakiris, M. (2012). The other in me: Interpersonal multisensory stimulation changes the mental representation of the self. *PLoS One*, 7(7), Article e40682. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040682>.
- Tajadura-Jiménez, A., Väljamäe, A., Toshima, I., Kimura, T., Tsakiris, M., & Kitagawa, N. (2012). Action sounds recalibrate perceived tactile distance. *Current biology: CB*, 22(13), R516–R517. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2012.04.028>.
- Tajadura-Jiménez, A., Lorusso, L., & Tsakiris, M. (2013). Active and passive-touch during interpersonal multisensory stimulation change self–other boundaries. *Consciousness and Cognition: An International Journal*, 22(4), 1352–1360.

- Tapus, A., & Matarić, M. J. (2006). Towards socially assistive robotics. *Int. J. Robot. Soc. Jpn.* 24, 576–578. doi: 10.7210/jrsj.24.576.
- Tapus, A., Maja, M., & Scassellatti, B. (2007). The grand challenges in socially assistive robotics. *IEEE Robotics and Automation Magazine*.
- Teneggi, C., Canzoneri, E., di Pellegrino, G., Serino, A., (2013). Social modulation of peripersonal space boundaries. *Curr. Biol.* 23, 406–411. doi:10.1016/j.cub.2013.01.043
- Thakkar KN, Nichols HS, McIntosh LG, Park S (2011). Disturbances in body ownership in schizophrenia: evidence from the rubber hand illusion and case study of a spontaneous out-of-body experience. *PLoS One* 6: e27089.
- Toet, A., Kuling, I. A., Krom, B. N., & van Erp, J. (2020). Toward Enhanced Teleoperation Through Embodiment. *Frontiers in robotics and AI*, 7, 14.  
<https://doi.org/10.3389/frobt.2020.00014>.
- Tsakiris, M., & Haggard, P. (2005). The rubber hand illusion revisited: visuotactile integration and self-attribution. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* 31, 80–91.
- 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>.
- Tsakiris, M., Prabhu, G. & Haggard, P. (2006). Having a body versus moving your body: How agency structures body-ownership. *Consciousness and Cognition*, 15 (2), 423-432.
- Tsakiris, M. (2008). Looking for myself: current multisensory input alters self-face recognition. *PLoS One* 3: e4040. doi: 10.1371/journal.pone.0004040.
- Tsakiris, M. (2010). My body in the brain: a neurocognitive model of body-ownership. *Neuropsychologia*, 48(3), 703–712.
- Tsakiris, M., & Critchley, H. (2016). Interoception beyond homeostasis: affect, cognition and mental health. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 371(1708), 20160002. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0002>.
- Tsakiris, M. (2017). The multisensory basis of the self: From body to identity to others. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 70(4), 597–609.

- Van Den Bos, E., & Jeannerod, M. (2002). Sense of body and sense of action both contribute to self-recognition. *Cognition* 85, 177–187.
- Varela, F. (1999). Cognition et Sciences cognitives in : D. Lecourt (Ed.), *Dictionnaire d'Histoire et de Philosophie des Sciences*, Presses Universitaires de France, pp.185-191.
- Ventre-Dominey, J., Gibert, G., Bosse-Platiere, M., Farnè, A., Dominey, P. F., & Pavani, F. (2019). Embodiment into a robot increases its acceptability. *Sci. Rep.* 9:10083. doi: 10.1038/s41598-019-46528-7.
- Verhulst, A., Normand, J.-M., Lombart, C., Sugimoto, M., & Moreau, G. (2018). Influence of being embodied in an obese virtual body on shopping behavior and products perception in VR. *Front. Robot. AI* 5:113.
- de Vignemont F., & Fournieret P. (2004) The sense of agency: A philosophical and empirical review of the “Who” system. *Conscience et Cognition* 13, 1–19.
- de Vignemont, F. (2011). Bodily Awareness. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2020 Edition), Edward N. Zalta (ed.).
- de Vignemont F, & Iannetti G. D. (2015). How many peripersonal spaces? *Neuropsychologia*, 70:327-334.
- de Vignemont, F. (2017). « Corps », version académique, dans M. Kristanek (dir.), *l'Encyclopédie philosophique*. <http://encyclo-philos.fr/corps-a/v>
- de Vignemont, F. (2018). *Mind the Body: An Exploration of Bodily Self-Awareness*. Oxford: Oxford University Press.
- Vogeley, K., & Fink, G. R. (2003). Neural correlates of the first-person-perspective. *Trends in cognitive sciences*, 7(1), 38–42.
- Vosgerau, G., and Synofzik, M. (2012). Weighting models and weighting factors. *Conscious. Cogn.* 21, 55–58.
- Wallon, H. (1970). De l'acte à la pensée. Essai de psychologie comparée, 2e éd., Paris, Flammarion, 1970.

- Wegner, D. M., & Wheatley, T. (1999). Apparent mental causation. Sources of the experience of will. *The American psychologist*, 54(7), 480–492. <https://doi.org/10.1037//0003-066x.54.7.480>.
- Walsh, L. D., Moseley, G. L., Taylor, J. L., & Gandevia, S. C. (2011). Proprioceptive signals contribute to the sense of body ownership. *J. Physiol.* 589, 3009–3021.
- Wegner, D. M., Sparrow, B., & Winerman, L. (2004). Vicarious agency: experiencing control over the movements of others. *J. Pers. Soc. Psychol.* 86, 838–848.
- Wicker, B., Keysers, C., Plailly, J., Royet, J. P., Gallese, V., & Rizzolatti, G. (2003). Both of us disgusted in My insula: the common neural basis of seeing and feeling disgust. *Neuron*, 40(3), 655–664.
- Wiese, E., Metta, G., & Wykowska, A. (2017). Robots as intentional agents: Using neuroscientific methods to make robots appear more social. *Frontiers in Psychology*, 8, Article 1663. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01663>.
- Wykowska A, Chaminade T, & Cheng G. (2016). Embodied artificial agents for understanding human social cognition. *Phil. Trans. R. Soc. B* 371: 20150375. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2015.0375>.
- Wong, H. Y. (2018). Embodied agency. *Philos. Phenomenol. Res.* 97, 584–612. doi: 10.1111/phpr.12392.
- Xu, X., Zuo, X., Wang, X., & Han, S. (2009). Do you feel my pain? Racial group membership modulates empathic neural responses. *The Journal of Neuroscience*, 29(26), 8525–8529.
- Zopf, R., Savage, G., & Williams, M. A. (2010). Crossmodal congruency measures of lateral distance effects on the rubber hand illusion. *Neuropsychologia*, 48(3), 713–725. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.10.028>.
- Zopf, R., Savage, G., & Williams, M. A. (2013). The Crossmodal Congruency Task as a Means to Obtain an Objective Behavioral Measure in the Rubber Hand Illusion Paradigm. *J. Vis. Exp.* (77), e50530, doi:10.3791/50530.