

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ALTÉRATION DU SENS DE L'AGENTIVITÉ EN AUTISME : DES MÉCANISMES DE
CONTRÔLE DE L'ACTION AUX DIFFICULTÉS DANS L'INTERACTION SOCIALE

THÈSE
PRÉSENTÉE
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DU DOCTORAT EN PSYCHOLOGIE

PAR
ALEXIS LAFLEUR

MARS 2022

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.04-2020). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier en premier lieu les participantes et les participants aux études de cette thèse. Sans votre générosité, votre soutien et votre appui, votre intérêt et votre curiosité, cette thèse, mais aussi toute recherche en psychologie, ne serait pas possible. Votre contribution est incontournable et j'aimerais souligner pleinement l'impact qu'elle peut avoir, à court, moyen et long termes, sur l'avancement des connaissances et, ultimement, sur le développement d'interventions psychologiques plus ajustées.

J'aimerais ensuite remercier ma directrice de recherche, Isabelle Soulières. Merci pour ton soutien et ta confiance dans ce long périple au sein du sens de l'agentivité. Je crois beaucoup en ce paradigme émergeant pour mieux comprendre le développement des différentes subjectivités. Ton ouverture, ton enseignement et ta collaboration tout au long du processus m'ont permis de me développer comme chercheur et comme clinicien. Aujourd'hui, intellectuellement, je me sens très différent, voire transfiguré, par rapport à 2014, quand ce doctorat a débuté! Merci aussi pour tes encouragements dans mes projets parascolaires variés comme celui de m'établir en campagne et de cultiver beaucoup de tomates et de pâtiſſons.

Merci également à mon co-directeur de recherche, Dr Baudouin Forgeot d'Arc. Mes rédactions ont beaucoup gagné à côtoyer ta rigueur argumentaire et tes connaissances poussées du champ de la cognition sociale en autisme. Comme je suis arrivé d'un autre champ d'étude au départ, j'ai énormément bénéficié de tes travaux de synthèse sur les sciences cognitives de l'autisme dans le développement de la vision déployée dans cette thèse.

Je voudrais ensuite remercier les collaboratrices et les collaborateurs à ce programme de recherche. Ainsi, un énorme merci à Vicky Caron, qui a été un pilier en tant qu'expérimentatrice lors de l'étude principale de cette thèse. Ta minutie et ton entregent ont été des atouts importants pour le bon déroulement de ce projet. Remerciements aussi à Éliane Danis et Lucie Barubé qui ont également contribué à l'administration de tests pour cette étude. Ce projet n'aurait pas été possible non plus sans les contributions majeures d'Hugues Leduc (conseils statistiques) et d'Anthony Hosein (programmation de la tâche psychophysique). Merci également à Armando Bertone pour ses conseils et son évaluation du projet alors que ce celui-ci était en cours de développement.

Je voudrais saluer et remercier mes collègues du Laboratoire sur l'intelligence et le développement en autisme ainsi que mes autres collègues du département de psychologie de l'UQÀM : Dominique, Éliane, Janie, Véronique, Camille, Anne-Marie, Valérie C., Valérie B., Vicky, Vanessa, Marie-Ève, Audrey, Alexa, Noémie et plusieurs autres. Le doctorat est un gros morceau de la vie et ça a été agréable de le partager avec des personnes smartes. Merci pour votre amitié.

Ma gratitude va également à mes ami.e.s et à ma famille pour m'avoir soutenu dans mon parcours académique et avoir écouté beaucoup d'envolées lyriques sur le sens de l'agentivité. Zoé, Michaël, Jean-Sé, mes parents (Denise Trudeau et François Lafleur), merci bin gros pour votre présence.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|-------|
| LISTE DES FIGURES | xliv |
| LISTE DES TABLEAUX | xlv |
| LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES | xlvii |
| LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS | xlix |
| RÉSUMÉ | 1 |
| ABSTRACT | lii |
| CHAPITRE I Introduction générale | 1 |
| 1.1 L'autisme | 2 |
| 1.1.1 Définition diagnostique | 2 |
| 1.1.2 Prévalence | 4 |
| 1.1.3 Étiologie et compréhension causale | 6 |
| 1.1.4 Les théories cognitives de l'autisme | 10 |
| 1.2 La cognition sociale en autisme | 17 |
| 1.2.1 Le rôle de l'étude de la cognition sociale dans la compréhension du phénotype autistique | 17 |
| 1.2.2 Approches en cognition sociale | 19 |
| 1.3 Une nouvelle approche en cognition sociale de l'autisme axée sur l'action et le sens de l'agentivité | 22 |
| 1.3.1 Repenser l'inter-action sociale: les aspects de réciprocité | 22 |
| 1.3.2 Manifestations motrices du TSA | 25 |
| 1.3.3 L'hypothèse de l'altération du sens de l'agentivité en autisme | 31 |
| 1.4 Objectifs et hypothèses de recherche | 32 |
| 1.4.1 Objectifs de la recension critique de la littérature (Chapitre II) | 33 |
| 1.4.2 Objectifs et hypothèses de l'étude de validation (Chapitre III) | 34 |
| 1.4.3 Objectifs et hypothèses de l'étude principale (Chapitre IV) | 35 |

| | |
|--|----|
| CHAPITRE II Cognition sociale et sens de l'agentivité en autisme : de l'action à l'interaction | 37 |
| 2.1 Introduction : la cognition sociale et les interactions en autisme | 40 |
| 2.2 Modèles explicatifs du SdA..... | 42 |
| 2.2.1 SdA implicite | 42 |
| 2.2.2 SdA explicite..... | 45 |
| 2.2.3 Perturbations du SdA | 47 |
| 2.3 Le SdA dans le TSA | 48 |
| 2.3.1 SdA implicite | 49 |
| 2.3.2 SdA explicite..... | 51 |
| 2.4 Conclusion | 53 |
| CHAPITRE III Sense of Agency: Sensorimotor signals and social context are differentially weighed at implicit and explicit levels | 64 |
| 3.1 Introduction..... | 66 |
| 3.1.1 Cue integration approach | 69 |
| 3.1.2 Characterizing cue integration at both implicit and explicit levels: the present experiment | 71 |
| 3.2 Material and methods | 72 |
| 3.2.1 Participants..... | 72 |
| 3.2.2 Apparatus | 73 |
| 3.2.3 Task and procedure | 74 |
| 3.2.4 Measures and data analysis | 80 |
| 3.3 Results | 82 |
| 3.3.1 Effect of social context and feedback alteration on implicit measure | 82 |
| 3.3.2 Effect of social context and feedback alteration on explicit measures ... | 83 |
| 3.3.3 Relationship between implicit and explicit measures | 86 |
| 3.4 Discussion..... | 86 |
| 3.4.1 Integration at implicit level: prospective sensorimotor cues dominate implicit level of SoA | 86 |
| 3.4.2 Integration at explicit level: Weighing of contextual and sensorimotor cues is interactive | 90 |
| 3.4.3 Absence of association between implicit and explicit SoA: independent or serial systems? | 93 |
| 3.5 Conclusion: implications for cue integration approach of SoA..... | 97 |

| | |
|---|-----|
| CHAPITRE IV Atypical implicit and explicit sense of agency in autism: an intermediate phenotype linking motor and social clinical features ? | 108 |
| 4.1 Introduction..... | 111 |
| 4.1.1 Implicit SoA in neurotypical and autistic individuals..... | 113 |
| 4.1.2 Explicit SoA in neurotypical and autistic individuals..... | 115 |
| 4.1.3 Characterizing the autistic cognitive profile for SoA by specifying cue integration processes | 117 |
| 4.2 Methods | 118 |
| 4.2.1 Participants | 118 |
| 4.2.2 General procedure | 120 |
| 4.2.3 Sense of agency task | 120 |
| 4.2.4 Assessment of autistic social and motor manifestations | 124 |
| 4.2.5 Measures and data analysis | 124 |
| 4.3 Results | 127 |
| 4.3.1 Effect of social context and feedback alteration on implicit measure .. | 127 |
| 4.3.2 Effect of social context and feedback alteration on explicit measures . | 129 |
| 4.3.3 Relationship between implicit and explicit SoA..... | 132 |
| 4.3.4 Relationship between SdA alterations and manifestations of autism ... | 134 |
| 4.4 Discussion..... | 137 |
| 4.4.1 Implicit SoA: abolished IB effect in autism as an indication of altered internal models of action..... | 137 |
| 4.4.2 Explicit SoA: under-reliance on sensorimotor cues to inform JoA in autism | 143 |
| 4.4.3 Relationship between implicit and explicit SoA: a window into autistic heterogeneity in SoA functioning ? | 146 |
| 4.4.4 Association between clinical features and SoA atypicalities: towards a greater recognition of behavioral and cognitive sensorimotor alterations | 150 |
| 4.5 Conclusion | 154 |
| CHAPITRE V Discussion générale: Contributions aux sciences cognitives de l'autisme et implications cliniques..... | 172 |
| 5.1 Retour sur les objectifs, les hypothèses et les principaux résultats | 173 |
| 5.1.1 Retour sur la recension critique de la littérature sur le sens de l'agentivité en autisme | 174 |
| 5.1.2 Retour sur l'étude de validation de la tâche psychophysique sur le sens de l'agentivité..... | 176 |

| | |
|---|-----|
| 5.1.3 Retour sur l'étude principale de caractérisation du profil de fonctionnement du sens de l'agentivité en autisme | 178 |
| 5.2 Contribution de l'approche en cognition sociale axée sur l'action et le sens de l'agentivité pour les sciences cognitives de l'autisme et la compréhension du phénotype autistique..... | 186 |
| 5.2.1 L'altération du sens de l'agentivité en schizophrénie et dans le trouble obsessionnel-compulsif : différentes atypies, différentes conséquences cliniques | 188 |
| 5.2.2 Altération de la conscience de l'action : ce que nous apprend le sens de l'agentivité sur la phénoménologie et le phénotype autistiques | 190 |
| 5.2.3 Comprendre les actions des autres : raisonnement métacognitif ou projection dans son propre système de l'action? | 194 |
| 5.2.4 L'hypothèse de l'altération du système des neurones miroirs en autisme : soutien, critiques et alternatives | 196 |
| 5.3 Perspectives d'intervention basées sur le sens de l'agentivité et la conscience de l'action..... | 198 |
| 5.3.1 Interventions ciblant l'amélioration spécifique des habiletés motrices | 199 |
| 5.3.2 Interventions ciblant la cognition motrice et la conscience de l'action | 200 |
| 5.3.3 Interventions par feedback sensorimoteur enrichi | 202 |
| 5.4 Limites et perspectives futures | 202 |
| 5.4.1 Représentativité de l'échantillon et déficience intellectuelle..... | 202 |
| 5.4.2 La question de la spécificité des altérations et des groupes contrôles cliniques | 203 |
| 5.4.3 Limites de l'effet de couplage d'intentionnalité comme marqueur du sens de l'agentivité..... | 204 |
| 5.4.4 Limites du <i>Reading the Mind in the Eyes Test</i> dans l'évaluation des manifestations sociales..... | 204 |
| CHAPITRE VI Conclusion générale | 206 |
| ANNEXE A Autres publications et communications durant le doctorat..... | 210 |
| RÉFÉRENCES..... | 212 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|-------------|
| CHAPITRE I | Page |
| 1.1 Modèle computationnel du contrôle moteur de Wolpert et Ghahramani – Illustré par Gowen et Hamilton | 27 |
| CHAPITRE II | Page |
| 2.1 Modèle du Comparateur – Inspiré de Blakemore et al., 2002 | 43 |
| 2.2 Niveaux implicite et explicite du SdA – Inspiré de Blakemore et al., 2002; Synofzik et al., 2013 et Zalla et Sperduti, 2015 | 46 |
| CHAPITRE III | Page |
| 3.1 Representation of a typical trial and force curve | 76 |
| 3.2 Implicit measure – Relative reproduction error means..... | 83 |
| 3.3 Self-attribution levels for judgments of agency..... | 84 |
| CHAPITRE IV | Page |
| 4.1 Schematic representation of trials under the operant (A) and the observation (B) conditions..... | 123 |
| 4.2 RRE means across experimental conditions and social contexts for autistic and neurotypical group..... | 127 |

| | |
|---|-----|
| 4.3 Self-attribution levels at the explicit level of SoA for autistic and neurotypical groups | 130 |
|---|-----|

LISTE DES TABLEAUX

| | | |
|--------------|---|------|
| CHAPITRE III | | Page |
| 3.1 | Main effects and pairwise comparisons of GEE model for judgments of agency – Self-attribution levels | 85 |
| CHAPITRE IV | | Page |
| 4.1 | Characteristics of the two recruited samples | 119 |
| 4.2 | Within group comparisons of RRE means across experimental conditions | 128 |
| 4.3 | Post-hoc pairwise comparisons for self-attribution levels at the explicit level of SoA | 131 |
| 4.4 | Comparisons of mean scores on social and motor manifestations tests | 134 |
| 4.5 | Correlations between social skills, motor performances and SoA atypicalities in the whole recruited sample..... | 136 |

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

Français :

IOA : cadre conceptuel de l'intégration optimale des indices d'agentivité

JdA : Jugement d'agentivité

LPI : Lobule pariétal inférieur

MdC : Modèle du Comparateur

SdA : Sens de l'agentivité

TDAH : Trouble déficitaire de l'attention avec ou sans hyperactivité

TSA : Trouble du spectre de l'autisme

Anglais :

ADHD : Attention Deficit Hyperactivity Disorder

ADI-R : Autism Diagnostic Interview - Revised

ADOS : Autism Diagnostic Observation Schedule

ANOVA : Analysis of Variance

APA : American Psychiatric Association

ASD: Autism Spectrum Disorder

CDC: Centres for Disease Control and Prevention

DSM: Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders

GEE: Generalized Estimating Equations

IB: Intentional Binding

IQ: Intelligence Quotient

IQR : Inter-quartile range

JoA : Judgment of Agency

MANOVA : Multivariate Analysis of Variance

MVC : Maximum Voluntary Contraction

p-SMA : Pre-supplementary motor area

RLB – Purdue : Right + Left + Both - Purdue

RMET : Reading the Mind in the Eyes Test

RRE: Relative Reproduction Error

SoA: Sense of Agency

ToM: Theory of Mind

WAIS: Wechsler Adult Intelligence Scale

WISC: Wechsler Intelligence Scale for Children

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS

° : degré d'angle/degree

dB: décibel/decibel

Hz: Hertz

in.: pouces/inches

M: moyenne/mean

ms: milliseconde/millisecond

N¹: Newton

N²: taille d'échantillon/sample size

OR : rapport des chances/odds ratio

s : seconde/second

SD : écart type/standard deviation

RÉSUMÉ

Les difficultés dans les interactions sociales réciproques et dans la sphère socio-communicative constituent un critère diagnostique et un trait cardinal du trouble du spectre de l'autisme. L'autisme est d'ailleurs souvent perçu comme un déficit spécifique de la cognition sociale à la suite de l'influente hypothèse de l'altération de la Théorie de l'Esprit. Toutefois, cette approche en cognition sociale de l'autisme néglige les aspects de réciprocité et de contrôle de l'action dans l'interaction. Si elles ne constituent pas un critère diagnostique de l'autisme, les difficultés dans la sphère motrice, comme la dyspraxie, et les difficultés de coordination, sont fréquentes et persistantes et plusieurs voix s'élèvent pour qu'elles soient considérées comme un trait cardinal de l'autisme. De plus, l'intensité de ces difficultés motrices apparaît liée à l'intensité des symptômes autistiques traditionnels. Le sens de l'agentivité (SdA), une fonction cognitive de l'architecture sensorimotrice, fait référence à la capacité de reconnaître que l'on est la cause d'une action et de ses conséquences dans l'environnement. Des altérations du SdA pourraient constituer un phénotype cognitif intermédiaire liant les manifestations comportementales autistiques de la sphère motrice et sociale. Ce programme de recherche doctoral cherche à effectuer une première caractérisation complète du fonctionnement du SdA chez les personnes autistes et à établir s'il existe un lien entre ces possibles altérations et les manifestations cliniques sociales et motrices.

Le chapitre II propose une revue critique de littérature sur les modèles émergeants du SdA et sur l'état du champ d'étude du SdA en autisme. Cette revue souligne l'émergence du modèle du SdA de l'intégration optimale des indices d'agentivité. Les indices sensorimoteurs prospectifs et rétrospectifs ainsi que les indices contextuels sont pondérés selon leur disponibilité et leur fiabilité aux deux niveaux du SdA, un niveau implicite préréflexif et un niveau explicite, mesuré par une attribution d'agentivité verbale et consciente. Bien qu'il existe des indications que les deux niveaux du SdA soit altérés en autisme, une majorité d'études sont fondées sur des mesures explicites uniquement et ne permettent pas de distinguer les contributions relatives des différents types d'indices d'agentivité.

Le chapitre III présente une étude de validation auprès d'adultes neurotypiques d'une tâche psychophysique du SdA développée par notre groupe. Cette tâche permet de mesurer simultanément le niveau implicite et explicite du SdA pour des mouvements

de pincement avec des conséquences visuelles. Le niveau implicite est mesuré via l'effet de couplage d'intentionnalité, une compression dans l'intervalle subjectif séparant une action auto-générée et sa conséquence dans l'environnement. Le SdA explicite y est mesuré par des jugements d'agentivité soi-autre. L'évaluation de la contribution des indices sensorimoteurs est rendue possible par la manipulation du feedback visuel et celle des indices contextuels par l'induction d'une croyance quant au nombre d'agents pouvant être la cause des conséquences de l'action.

Le chapitre IV comprend l'étude de caractérisation du fonctionnement du SdA en autisme. La tâche psychophysique du SdA, ainsi qu'un test neuropsychologique de coordination/dextérité fine, le *Purdue Pegboard*, et de Théorie de l'Esprit, le *Reading the Mind in the Eyes Test*, ont été administrés à un échantillon d'adultes autistes et à un groupe contrôle. Les résultats montrent que le fonctionnement du SdA implicite et explicite, ainsi que le dynamique entre les deux niveaux du SdA, présentent des atypies en autisme. Au niveau implicite, l'effet de couplage d'intentionnalité est aboli dans la modalité visuelle, ce qui suggère une difficulté à employer les signaux prospectifs qui découlent de la formation des modèles internes de l'action. Toutefois, les personnes autistes présentent une plus grande hétérogénéité dans leur profil implicite, avec trois sous-groupes équivalents en proportion aux profils distincts (couplage, abolition du couplage et découplage). Au niveau explicite, les personnes autistes présentent une sous-utilisation des indices sensorimoteurs rétrospectifs. Nous identifions également que, à l'opposé des personnes neurotypiques, l'échantillon de personnes autistes affiche une association positive entre les estimations temporelles et les probabilités de s'attribuer la cause des conséquences visuelles de l'action. Ainsi, le couplage d'intentionnalité au niveau implicite n'informerait pas l'agentivité au niveau conscient comme chez les personnes neurotypiques. Les adultes autistes présentent également des performances moindres concomitantes aux tests de coordination/dextérité et d'habiletés de Théorie de l'Esprit. Les difficultés de coordination sont corrélées aux difficultés à employer les indices sensorimoteurs rétrospectifs au niveau implicite. Nous observons également un tendance statistique pour association d'intensité légère entre les difficultés de coordination et de Théorie de l'Esprit et les indicateurs d'atypies aux niveaux implicite et explicite, ce qui est compatible avec l'hypothèse que le SdA pourrait être un phénotype cognitif intermédiaire liant les manifestations sociales et motrices de l'autisme.

Mots clés : autisme, sens de l'agentivité, cognition sociale, motricité, conscience et contrôle de l'action

ABSTRACT

Difficulties in reciprocal social interactions and in the socio-communicative sphere constitute a diagnostic criterion and a cardinal trait of autism spectrum disorder (ASD). Autism is often seen as a specific deficit in social cognition as a result of the influential Theory of Mind alteration hypothesis. However, this approach of social cognition in autism neglects aspects of reciprocity and of action control in social interactions. Although they are not a diagnostic criterion for autism, difficulties in the motor sphere, such as dyspraxia, and difficulties with coordination, are frequent and persistent. Several authors consider that motor difficulties should be added as cardinal traits of autism. In addition, the intensity of these motor difficulties appears to be related to the intensity of traditional autistic symptoms. Sense of Agency (SoA), a cognitive function of the sensorimotor architecture, refers to the ability to recognize that one is the cause of an action and of its consequences in the environment. SoA alterations could constitute an intermediate cognitive phenotype linking autistic behavioral manifestations in the motor and social spheres. This doctoral research program seeks to perform a first complete characterization of SoA functioning in autistic individuals and to establish whether there is a link between these possible alterations and the clinical social and motor manifestations.

Chapter II provides a critical review of the literature on emerging models of SoA and the state of the field of SoA functioning in autism. This review highlights the emergence of the optimal cue integration model of SoA. Prospective and retrospective sensorimotor cues as well as contextual cues are weighted according to their availability and reliability at two levels, an implicit pre-reflexive level and an explicit level, measured by a verbal and conscious attribution of agency. Although there are indications that both levels of SoA are altered in autism, a majority of studies are based only on explicit measures and fail to distinguish the relative contributions of these different types of agency cues.

Chapter III presents a validation study of a psychophysical SoA task developed by our group. This task allows simultaneous assessment of the implicit and explicit level of SoA for pinching movements with visual consequences. The implicit level is measured via the intentional binding effect, a compression in the subjective interval between a self-generated action and its consequence in the environment. Explicit SoA is measured by self/other dichotomic judgments of agency. The evaluation of the

contribution of sensorimotor cues is made possible by the manipulation of visual feedback. Contextual cues are manipulated by induced beliefs about the number of agents that can be plausible causes of the action's visual outcome.

Chapter IV presents the study in which we performed a complete characterization of SoA in autistic individuals. The SoA psychophysical task, along with neuropsychological tests of fine motor skills/coordination (Purdue Pegboard) and of Theory of Mind (Reading the Mind in the Eyes Test) were administered to a sample of adults with autism and to a control group. The results show that the functioning of implicit and explicit SoA, as well as the dynamics between the two levels of SoA, presents atypicalities in autism. At the implicit level, the intentional binding effect is abolished in the visual modality, suggesting a difficulty in the use of prospective cues that arise from the formation of internal patterns of action. However, people with autism show greater heterogeneity in their implicit profile, with three subgroups of distinct profiles with equivalent proportions (binding, abolition of binding and unbinding). At the explicit level, people with autism exhibit an under-use of retrospective sensorimotor cues. We also identify that, in contrast to neurotypical people, the sample of autistic adults displays a positive association between temporal estimates and the odds of self-attributing the cause of the visual consequences of the action. Thus, intentional binding at the implicit level would not inform agency at the conscious level as in neurotypical people. Autistic adults also exhibit concurrent lower performance on tests of coordination/dexterity and Theory of Mind skills. Difficulties in coordination are correlated with difficulties in using retrospective sensorimotor cues at the implicit level. We also observe a statistical trend for mild association between coordination and Theory of Mind difficulties and indicators of atypicalities at the implicit and explicit levels, which is consistent with the hypothesis that SoA might be an intermediate cognitive phenotype linking the social and motor manifestations of autism.

Keywords : autism, sense of agency, social cognition, motor skills, action's control and awareness

CHAPITRE I

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 L'autisme

1.1.1 Définition diagnostique

Le psychiatre Leo Kanner a offert une première description de l'autisme dans sa publication séminale « Les perturbations autistiques du contact affectif » [traduction] en 1943 (Kanner, 1943). Kanner y faisait la présentation de 11 enfants de sa clinique de pédopsychiatrie à l'Hôpital John Hopkins aux États-Unis, qu'il décrivait comme intelligents, mais affichant un « puissant désir d'être seul » et une « insistance obsessive et persistante pour l'immuabilité ». Il a alors donné le nom de « autisme infantile précoce » à cette condition. Bien que Kanner ait insisté tout au long de sa carrière pour distinguer le syndrome qu'il avait décrit d'autres troubles neurologiques ou psychopathologiques, et même de la déficience intellectuelle, l'autisme a été largement considéré dans les années 60 par le courant psychanalytique comme une forme de retrait psychotique propre à une forme infantile de la schizophrénie (Baker, 2013). Les recherches d'après-guerre sur la privation parentale ont alors mené à imposer une vision erronée de l'autisme comme une réponse psychologique des enfants à des mères émotionnellement distantes, tristement étiquetées « mères réfrigérateurs » (Fombonne, 2003b). Dans les années 70, ce paradigme psychanalytique décline pour laisser place à une compréhension de l'autisme comme ayant une source biologique et comme étant non mutuellement exclusif avec la déficience intellectuelle (Baker, 2013).

Ainsi, dans la troisième édition du « Manuel diagnostique des troubles mentaux » [traduction] (DSM-III; American Psychiatric Association, 1980), l'autisme est défini comme un trouble envahissant du développement distinct, fondé sur trois domaines de manifestations : un manque de réactivité aux autres personnes, une altération marquée des habiletés de communication et des réponses étranges à des aspects variés de l'environnement. Le DSM-III-R (American Psychiatric Association, 1987) offre

ensuite une définition plus complexe de l'autisme (Baker, 2013; Volkmar & Reichow, 2013) en introduisant un système de critères dans trois domaines révisés, soient les interactions sociales, la communication, puis les intérêts et champs d'activité restreints. Les enfants rencontrant certains de ces critères, mais pas en nombre suffisant pour recevoir un diagnostic d'autisme, peuvent alors être diagnostiqués avec un trouble envahissant du développement non spécifié. Cependant, les critères de cette mouture du DSM sont critiqués pour leur tendance à surdiagnostiquer l'autisme chez les enfants avec une déficience intellectuelle et à sous-diagnostiquer les personnes avec un plus haut fonctionnement intellectuel (Volkmar & Klin, 2005). Plus contemporainement, le DSM-IV (American Psychiatric Association, 1994) et le DSM-IV-TR (American Psychiatric Association, 2000) établissent une définition améliorant l'équilibre entre sensibilité et spécificité à travers tous les niveaux de fonctionnement intellectuel et augmentant la fiabilité du diagnostic à travers les différents cliniciens (Volkmar & Reichow, 2013). L'addition à la catégorie des troubles envahissants du développement du syndrome d'Asperger et du syndrome de Rett est aussi une modification d'importance apportée à cette version du DSM (Baker, 2013).

Actuellement, la définition diagnostique utilisée par la communauté scientifique et clinique est celle du DSM-5 (American Psychiatric Association, 2013). Dans cette version la plus récente du manuel diagnostique, l'autisme est désormais situé comme un trouble neurodéveloppemental nommé trouble du spectre de l'autisme (TSA) et la catégorisation en troubles envahissants du développement est éliminée, dissolvant du même coup les diagnostics catégoriels de syndrome d'Asperger et de trouble envahissant du développement non spécifié. Le TSA est ainsi conceptualisé comme un continuum sur lequel se retrouve un ensemble hétérogène d'individus du point de vue comportemental, cognitif et développemental (Fountain, Winter, & Bearman, 2012). Le TSA est diagnostiqué en fonction de deux domaines de critères, le premier impliquant la présence de déficits dans la communication et les interactions sociales

réciproques et le second, la présence de patrons de comportements, d'intérêts et d'activités restreints et répétitifs. Les exemples offerts dans le premier domaine pour illustrer le phénotype social autistique soulignent largement les difficultés dans les aspects de réciprocité des interactions sociales (partage réduit des intérêts, émotions et affects, incapacité à initier des interactions, anomalies dans le contact visuel, le langage corporel et l'usage de gestes, absence totale d'expressions faciales et de communication non-verbale, etc.). Le second domaine comprend quant à lui d'importantes manifestations autistiques comme la présence de mouvements (gestes, utilisation d'objets ou langage) répétitifs et stéréotypés, d'une adhérence inflexible à des routines, d'intérêts hautement restreints et persévératifs et d'une réactivité atypique aux aspects sensoriels de l'environnement. Le diagnostic de TSA rend compte de la variabilité au sein du spectre à l'aide de cinq spécificateurs qui doivent être déterminés par les cliniciens. Ainsi, le diagnostic est accompagné d'une mention quant à la présence ou l'absence de déficience intellectuelle et de retard de langage, ainsi que quant à l'association du TSA avec une condition médicale ou génétique, un autre trouble neurodéveloppemental ou avec de la catatonie.

1.1.2 Prévalence

Le taux estimé de prévalence du TSA dans la population n'a cessé de progresser depuis les années 60, puisque les enquêtes de prévalence étaient alors constituées de simples décomptes, dans des régions circonscrites, d'enfants présentant un phénotype autistique marqué (Fombonne, 2018). Les techniques d'enquête se sont depuis lors raffinées, mais les estimations plus récentes présentent une certaine variabilité, notamment en raison des changements apportés aux définitions diagnostiques à travers le temps et en raison d'une toute aussi grande variabilité rencontrée dans les méthodes d'enquête déployées par les chercheurs (Elsabbagh et al., 2012). Le *Center for Disease Control and Prevention* (CDC; soit le Centre de contrôle et de prévention des maladies) aux États-Unis publie régulièrement des enquêtes de prévalence

nationale du TSA, qui sont fortement citées dans la recherche en autisme. Le CDC a estimé la prévalence du TSA aux États-Unis à 1,46 % en 2012 (Christensen et al., 2018), à 1,68 % en 2014 (Baio et al., 2018) et à 1,85 % en 2016 (Maenner et al., 2020). Certains chercheurs considèrent toutefois que la méthodologie employée par le CDC surévalue la prévalence réelle du TSA (e.g. Fombonne, 2018). Les auteurs affiliés au CDC étudient en effet les dossiers médicaux de 11 sites hospitaliers situés dans 11 états différents et appliquent une série de pondérations statistiques complexes pour rendre compte des biais dans l'échantillonnage et les taux de participation. Dans l'application de ces corrections, il est assumé que les données manquantes renferment un taux de TSA équivalents à celui présent dans les données comptabilisées. Or, il est possible que cette présupposition soit erronée, puisque les parents d'enfants avec un TSA affichent généralement un taux de participation plus élevé dans les enquêtes épidémiologiques (Fombonne, 2003a).

Il existe également une certaine variabilité à travers les estimations de prévalence dans différents pays et à travers différents sous-groupes culturels. Plusieurs chercheurs estiment que ces variations de prévalence sont occasionnées, au-delà de l'impact des différentes approches méthodologiques des enquêtes, par un phénomène de sous-estimation de la prévalence dans les communautés défavorisées ou éloignées des grands centres où l'accessibilité au système de santé est moindre, ainsi que dans les cultures où la conscientisation par rapport à l'autisme est plus récente (Elsabbagh et al., 2012; Fombonne, 2018; Zhou et al., 2020). En guise de comparaison avec les données américaines citées ci-dessus, la prévalence du TSA était estimée à 0,70 % en Chine entre 2014 et 2016 (Zhou et al., 2020), à 0,87 % dans la ville de Guanajuato au Mexique en 2011-2012 (Fombonne et al., 2016) et à 1,23 % en Catalogne en 2017 (Pérez-Crespo et al., 2019). Au Québec, la prévalence a été estimée à 1,2 % en 2014-2015 (Diallo et al., 2018).

Il est à noter qu'il existe une importante disparité entre les sexes dans la prévalence du diagnostic de TSA. Ainsi, le DSM-5 (American Psychiatric Association, 2013) rapporte que la proportion de personnes de sexe masculin diagnostiquées avec un TSA par rapport à celles de sexe féminin est de quatre pour un (4 :1). Dans sa plus récente enquête en 2016 (Maenner et al., 2020), le CDC rapporte une disparité semblable avec une prévalence 4,3 fois plus élevée chez les garçons que chez les filles. Toutefois, un nombre grandissant d'études épidémiologiques semblent suggérer que la disparité pourrait être plus faible que la valeur 4 :1 généralement reconnue et incluse dans le DSM-5. Ainsi, Baxter et al. (2015) rapportent un ratio de prévalence homme : femme de 3 :1, Y. S. Kim et al. (2011), un ratio de 2,5 :1 et Idring et al. (2015), un ratio de 2,5 :1. Il est avancé que la disparité dans les taux de diagnostics entre les sexes ne trouveraient pas sa source uniquement par des différences biologiques menant à un écart objectif dans la prévalence du TSA, mais que plusieurs biais liés au genre dans l'évaluation diagnostique, ainsi que dans la conceptualisation même du TSA influencerait la capacité des cliniciens à détecter les manifestations de l'autisme chez les personnes de sexe féminin (Goldman, 2013; Werling, 2016).

1.1.3 Étiologie et compréhension causale

Le TSA est une condition clinique décrite dans le DSM-5 en termes comportementaux, mais qui est sous-tendue par des étiologies hétérogènes (Folstein & Rosen-Sheidley, 2001; Jeste & Geschwind, 2014). Pour rendre compte des différentes étiologies pouvant mener à un phénotype autistique, Geschwind and Levitt (2007) suggèrent de nommer cet ensemble hétérogène de conditions « les autismes » [traduction].

Les connaissances sur l'héritabilité du TSA proviennent notamment d'études comparant des cohortes de jumeaux monozygotes et dizygotes. Une méta-analyse (Tick, Bolton, Happé, Rutter, & Rijsdijk, 2016) a révélé que les taux d'héritabilité

génétique estimés par sept études sur la question se situaient entre 64 % et 91 %. Les auteurs de cette méta-analyse concluent que la large majorité des résultats des études en héritabilité sont conformes avec une compréhension causale du TSA comme ayant une source principalement génétique, vision qui est également appuyée par une étude d'héritabilité parue plus récemment (Sandin et al., 2017). Il existe toutefois un débat sur cette question, alors qu'un autre groupe de chercheurs soutient plutôt que les facteurs génétiques ont un impact modéré sur le développement du TSA et que les facteurs environnementaux partagés par les jumeaux expliquent une plus grande part de l'héritabilité observée (Hallmayer et al., 2011).

Il existe tout de même une reconnaissance que certains facteurs environnementaux peuvent exercer un effet pour augmenter la probabilité de développer un TSA. Ainsi, une méta-analyse portant sur 27 études a indiqué qu'un âge avancé des parents à la procréation augmentait les risques de développement du TSA chez la progéniture de façon significative (Wu et al., 2017). En effet, l'augmentation de l'âge de dix ans chez la mère et le père est associée à un risque accru de 18 % et 21 %, respectivement. L'augmentation des risques associés à l'âge des parents est conceptualisée comme découlant du risque accru de mutations génétiques *de novo* dans les gamètes, particulièrement chez les gamètes paternelles, et de complications obstétriques chez les femmes plus âgées (Bölte, Girdler, & Marschik, 2019; C. Wang, Geng, Liu, & Zhang, 2017). Quelques facteurs gestationnels tel que le diabète gestationnel (C. Wang et al., 2017) et l'utilisation d'antidépresseurs par la mère durant la gestation (Mezzacappa et al., 2017) sont associés à des taux plus élevés de TSA chez la progéniture, mais la taille d'effet de ces facteurs est considérée comme modeste. Il est finalement important de noter que l'étude de l'impact des contaminants environnementaux sur le développement de l'autisme demeure actuellement à un stade embryonnaire (Bölte et al., 2019).

Chez la majorité des personnes diagnostiquées avec un TSA, l'étiologie génétique de leur condition est complexe et relève de la contribution de multiples gènes aux mécanismes d'action divers (Caglayan, 2010). Toutefois, environ 10 % des individus autistes présentent le phénotype en association avec un syndrome génétique comme une maladie monogénique ou des anomalies chromosomales, les plus fréquentes étant le syndrome du X-fragile, la sclérose tubéreuse et des réarrangements dans le chromosome 15 (Benvenuto, Moavero, Alessandrelli, Manzi, & Curatolo, 2009). En ce sens, une distinction est établie entre les formes dites « syndromiques » et « non-syndromiques » de l'autisme. Les formes non-syndromiques d'autisme sont quant à elle associées à de nombreuses mutations qui peuvent être catégorisées dans deux grands types selon les portions du génome qu'elles affectent, soit les mutations affectant les variantes rares du génome et les mutations affectant les variantes communes (Woodbury-Smith & Scherer, 2018). En effet, chaque humain possède environ trois millions de variantes génétiques dans son génome. Parmi celles-ci, les variantes communes constituent 95 % des variantes génétiques totales et sont partagées avec 5 % de la population. Les variantes rares constituent les 5 % restant du génome et peuvent être partagées avec de 1-4 % de la population générale ou être spécifiques à un individu et sa famille immédiate. Un des mécanismes de mutation importants impliqué dans l'étiologie de l'autisme et touchant les variantes rares du génome est la variabilité du nombre de copies (ou *copy number variation* en anglais), qui implique des duplications ou des délétions multiples de segments de plus de 1000 paires de base dans le génome (Zarrei, MacDonald, Merico, & Scherer, 2015). Plusieurs des gènes affectés par des mutations *de novo* de ce type ont été répertoriés comme augmentant significativement la susceptibilité de développer un TSA, et c'est le cas par exemple du gène codant pour la molécule neuroxine-1 (Buxbaum, 2009; Woodbury-Smith & Scherer, 2018).

L'élaboration d'une compréhension causale globale de l'autisme implique également d'établir des ponts entre la compréhension de l'étiologie génétique et le phénotype

comportemental observé en clinique. En ce sens, le développement récent des approches par phénotype intermédiaire offre une perspective intéressante pour développer une compréhension de l'impact des mutations génétiques sur les réseaux neurofonctionnels et les processus physiologiques cérébraux sous-tendant les conditions psychiatriques (Rasetti & Weinberger, 2011). Pour reprendre l'exemple utilisé ci-dessus, il a été montré que des variations structurelles dans le gène neurexine-1 sont simultanément associées à un risque plus élevé de développer un TSA ou une schizophrénie, à une réduction du volume de matière blanche dans les lobes frontaux et à une réduction des performances à une tâche neuropsychologique évaluant le fonctionnement sensorimoteur (Voineskos et al., 2011), soit le test de tapotement des doigts (finger tapping test; Schmitt, 2013). Les études sur le phénotype intermédiaire permettent en ce sens de réduire l'écart entre la compréhension des facteurs biologiques et les comportements observés en clinique en spécifiant les systèmes neurofonctionnels de base qui sont modulés par les mutations répertoriées. Cependant, afin de développer un modèle causal global de l'autisme, qui tient notamment compte des impacts des altérations des systèmes neurofonctionnels de base sur les processus mentaux plus complexes, il est nécessaire d'inclure un autre niveau d'explication, en proposant des modèles cognitifs (Morton & Frith, 1995). Les modèles cognitifs sont en effet à même d'expliquer les répercussions des altérations des systèmes neurofonctionnels sur les comportements des individus et permettent d'expliquer les manifestations bégaviorales complexes observées en clinique. Ces modèles constituent donc un niveau d'analyse primordial dans l'entreprise de créer une compréhension causale de l'autisme, qui est à son tour à même d'informer le développement et le raffinement d'interventions pour augmenter la qualité de vie des personnes autistes.

1.1.4 Les théories cognitives de l'autisme

Les premiers efforts systématiques pour caractériser les différences cognitives qui pouvaient expliquer les manifestations autistiques ont été propulsés par la mouvance de la Théorie de l'Esprit dans les années 80 (Baron-Cohen, Leslie, & Frith, 1985; voir description détaillée plus bas) et ont insisté sur l'étude de la cognition sociale (Forgeot d'Arc & Mottron, 2012). Il s'agissait alors d'une première théorie à mettre l'emphase sur un déficit dans une fonction cognitive comme élément central et possiblement causal de la présentation clinique autistique (Rajendran & Mitchell, 2007). L'émergence d'autres modèles du fonctionnement cognitif dans le TSA mettant l'emphase sur des aspects non-sociaux, comme les modèles de haut niveau (e.g. modèle de la cohérence centrale réduite, Frith, 1989; Happé & Frith, 2006) dans les années 90 ou les modèles perceptifs dans les années 2000 (e.g. modèle du surfonctionnement perceptif, Mottron & Burack, 2001; Mottron, Dawson, Soulières, Hubert, & Burack, 2006) sont depuis venus relativiser l'importance accordée aux particularités sociales dans la caractérisation du phénotype autistique global. Nous nous contentons ci-dessous de détailler les hypothèses de l'altération de la Théorie de l'Esprit et du dysfonctionnement exécutif en raison de leurs liens plus étroits avec la nouvelle approche en cognition sociale que nous proposons dans la présente thèse. Pour une revue critique des différentes théories cognitives en autisme, nous renvoyons à Rajendran and Mitchell (2007) et à Lind and Williams (2011).

Au-delà des différences sur les domaines de la cognition sur lesquels ils se centrent, les différents modèles cognitifs de l'autisme diffèrent également dans leur valeur explicative et dans leur façon de définir le rôle des particularités cognitives dans l'étiologie des manifestations cliniques de l'autisme. Ainsi, les théories cognitives peuvent être évaluées en fonction de leur universalité, c'est-à-dire par rapport à la prévalence des particularités cognitives qu'elles mettent en évidence chez les personnes diagnostiquées avec un TSA, et de leur spécificité, c'est-à-dire la mesure

dans laquelle les particularités cognitives parviennent à différencier le TSA de la plupart des autres diagnostics psychiatriques (Lind & Williams, 2011; Rajendran & Mitchell, 2007). Certaines théories postulent également que les particularités relevées constituent un module cognitif altéré qui sous-tend l'ensemble des autres particularités cognitives rencontrées en autisme, alors que d'autres peuvent, par contraste, souligner que plusieurs aspects interconnectés du fonctionnement cognitif, mais non nécessairement dépendants, sont simultanément marqués par des altérations expliquant uniquement une partie circonscrite de la présentation comportementale autistique.

1.1.4.1 L'hypothèse de l'altération de la Théorie de l'Esprit

L'hypothèse de l'altération de la Théorie de l'Esprit, ou des habiletés de mentalisation, en autisme (Baron-Cohen et al., 1985) est une théorie modulariste qui postule que les difficultés sociales comportementales des personnes autistes proviennent d'un déficit primaire de la capacité d'attribuer des états mentaux aux autres, comme des croyances, des désirs ou des intentions. Vers l'âge de 18 mois, les enfants au développement typique acquerraient la capacité de générer des représentations de deuxième ordre à propos des représentations du monde d'autres personnes, mais cette capacité serait spécifiquement atteinte chez les enfants autistes (Leslie & Roth, 1993; Leslie & Thaiss, 1992). Cette hypothèse affiche également une cohérence apparente puisqu'elle semble expliquer des comportements saillants au quotidien chez les personnes avec un TSA, comme une moins grande propension à raconter des blagues ou des mensonges, à utiliser le sarcasme ou à manipuler les croyances des autres (Lind & Williams, 2011). Dans leur étude séminale de 1985, Baron-Cohen, Leslie et Frith ont montré que 80 % des enfants autistes obtenaient des performances moindres à une tâche de fausse croyance sur la localisation d'un objet (Wimmer & Perner, 1983), transféré à une autre localisation à l'insu d'une protagoniste. Cette étude constituait la preuve, pour les auteurs, qu'un déficit de

Théorie de l’Esprit constituait la source des difficultés socio-communicatives rencontrées dans l’autisme.

Cet argument a été critiqué (notamment, Bowler, 1992, 2007) puisque, bien que le groupe d’enfants autistes de l’étude de Baron-Cohen, Leslie et Frith obtenaient des résultats généralement moindres, 20 % des enfants autistes demeuraient en mesure de réussir la tâche. Des études subséquentes (Bowler, 1992; Ozonoff, Rogers, & Pennington, 1991) sont également venues montrer qu’une large proportion (jusqu’à 73 % dans Bowler, 1992) de personnes avec un syndrome d’Asperger obtenait des performances similaires aux personnes neurotypiques sur les tâches de Théorie de l’Esprit. De plus, une méta-analyse sur 27 études (Happé, 1995b) confirmait à nouveau qu’une proportion de 20 % d’enfants autistes parviennent à réussir des tâches répandues de Théorie de l’Esprit. Ces données soulignent que les difficultés en Théorie de l’Esprit n’apparaissent pas universelles en autisme et remettent en doute une formulation forte de l’hypothèse de l’altération de la Théorie de l’Esprit comme source des difficultés socio-communicatives (Lind & Williams, 2011).

En réponse à ce type de critiques, Baron-Cohen (1989) a modulé sa théorie en proposant que les enfants autistes affichaient un retard de développement en matière de mentalisation plutôt qu’un déficit. Cette modification semble en ce sens appuyée par la méta-analyse de Happé (1995b) qui suggérait que la réussite des tâches de fausses croyances chez les enfants autistes était assurée à partir du fonctionnement verbal équivalent à l’âge de 12 ans, alors que la totalité des enfants au développement typique réussissent ces tâches à partir d’un fonctionnement verbal de 4 ans. Afin d’éviter les effets plafond de performance liés aux tâches de fausses croyances chez les personnes autistes avec un fonctionnement verbal élevé, les chercheurs ont également développé des tâches de Théorie de l’Esprit dites avancées, dont une tâche destinée aux adultes nommée *Reading the Mind in the Eyes Test* (RMET, Lire l’esprit dans les yeux [traduction]) (Baron-Cohen, Jolliffe, Mortimore, & Robertson, 1997;

Baron-Cohen, Wheelwright, Hill, Raste, & Plumb, 2001), qui consiste à identifier une émotion ou un état d'esprit, parmi 4 choix, à partir d'images de la portion des yeux d'un visage. Baron-Cohen et al. (2001) ont montré que les adultes autistes obtenaient en moyenne des scores moindres (21,9 sur 36) à ce test par rapport aux personnes issues de la population générale appariées pour le fonctionnement intellectuel (30,9 sur 36), résultat qui est confirmé par une méta-analyse plus contemporaine portant sur 18 études ayant employé le RMET (Peñuelas-Calvo, Sareen, Sevilla-Llewellyn-Jones, & Fernández-Berrocal, 2019). Il est tout de même à propos de se questionner si les performances moindres des personnes autistes au RMET témoignent d'un déficit cognitif central à la symptomatologie socio-communicative, puisque les participants autistes des 18 études répertoriées dans la méta-analyse ci-mentionnée réussissaient tout de même en moyenne 59,25 % des items du test, des performances qui ne suggèrent pas un affaissement complet des capacités de Théorie de l'Esprit. Il n'apparaît en ce sens pas convaincant qu'une altération partielle de la capacité à reconnaître les émotions dans les visages sous-tende l'ensemble des difficultés socio-communicatives cliniquement observées en autisme. Les mesures traditionnelles de la Théorie de l'Esprit sont également critiquées pour leur manque de fiabilité chez les adultes (Pinkham, Harvey, & Penn, 2018), leurs effets plafonds rencontrés chez les adultes et les adolescents (Ponnet, Buysse, Roeyers, & De Clercq, 2008) et leurs difficultés à réellement rendre compte des aspects de réciprocité dans l'interaction (Forgeot d'Arc, Devaine, & Daunizeau, 2020).

Si l'on peut affirmer que l'hypothèse de l'altération de la Théorie de l'Esprit a largement contribué à imposer l'approche cognitive dans l'étude de l'autisme (Rajendran & Mitchell, 2007) et a permis d'expliquer une partie des manifestations comportementales autistiques saillantes dans la sphère socio-communicative (Lind & Williams, 2011), les données issues de ce courant de recherche ne permettent pas de soutenir que la majorité du phénotype comportemental et cognitif des personnes autistes résulte d'un déficit primaire de la Théorie de l'Esprit (Forgeot d'Arc &

Mottron, 2012). Les manifestations socio-communicatives ne représentent qu'une portion du phénotype autistique et l'hypothèse de l'altération de la Théorie de l'Esprit échoue à expliquer la présence d'autres manifestations autistiques cardinales (Rajendran & Mitchell, 2007), dont la présence de comportements répétitifs et d'intérêts restreints ou des particularités dans la sphère sensori-motrice (Caminha & Lampreia, 2012; Coll, Foster, Meilleur, Brambati, & Hyde, 2020; Fournier, Hass, Naik, Lodha, & Cauraugh, 2010; Gowen & Hamilton, 2013; Hannant, Tavassoli, & Cassidy, 2016; Mosconi & Sweeney, 2015; Whyatt & Craig, 2013).

1.1.4.2 L'hypothèse du dysfonctionnement des fonctions exécutives

L'hypothèse du dysfonctionnement des fonctions exécutives a été explorée à la suite de l'observation que certaines manifestations comportementales et cognitives en autisme, telles que la persévération, la flexibilité cognitive et la planification partageaient des similarités avec les symptômes rencontrés chez les patients souffrant de lésions frontales (Forgeot d'Arc & Mottron, 2012; Rajendran & Mitchell, 2007). Cette hypothèse s'écarte de celle de l'altération de la Théorie de l'esprit puisqu'elle n'est pas spécifique au domaine du traitement cognitif social et se rapporte plutôt à des fonctions cognitives générales. Une des forces de cette hypothèse est qu'elle expliquerait directement les manifestations autistiques dans la sphère des comportements répétitifs et des intérêts restreints, comme l'adhésion à une routine rigide et la persévération dans les activités (Hughes, Russell, & Robbins, 1994). Il a également été postulé que cette atteinte exécutive pourrait entraîner à son tour une cascade d'effets développementaux faisant apparaître les déficits rencontrés dans la sphère socio-communicative (Hill, 2004b).

Un nombre abondant de définitions du construct des fonctions exécutives ont été proposées et il n'existe pas de consensus total sur ses sous-composantes (Jurado & Rosselli, 2007). Lezak, Howieson, Loring, Hannay, and Fisher (2004) situent toutefois les fonctions exécutives comme étant les capacités qui permettent à une

personne de s'engager efficacement dans des comportements motivés, indépendants et orientés vers un but. Dans une méta-analyse et revue critique des premiers travaux sur les fonctions exécutives en autisme, Hill (2004a) s'est penchée sur des sous-composantes jugées pertinentes à l'autisme, soient la planification, l'inhibition, la flexibilité, la générativité et le monitoring de l'action. L'auteure rapporte des performances largement intactes en autisme aux tâches d'inhibition telles que le Stroop et le Go/No go et des résultats partagés pour les autres sous-composantes avec des performances parfois inférieures, mais parfois préservées en planification (Hughes et al., 1994 mais ; Mari, Castiello, Marks, Marraffa, & Prior, 2003), en flexibilité (Szatmari *et al.*, 1990, mais Minshew *et al.*, 1992) et en générativité (Minshew *et al.*, 1992 mais ; Scott & Baron-Cohen, 1996). Hill (2004b) conclut à une absence de consensus sur les aspects déficitaires des fonctions exécutives en autisme et à un impact important de plusieurs facteurs confondants dans les études revues, tels les troubles d'apprentissage, la possibilité que d'autres fonctions cognitives soient impliquées dans les tâches normalement employées pour isoler les sous-composantes, les habiletés verbales, etc. Hill (2004a) souligne toutefois la contribution d'une étude de Ozonoff and Jensen (1999), ayant contrasté les performances d'enfants autistes, d'enfants neurotypiques et d'enfants avec un diagnostic de trouble déficitaire de l'attention avec hyperactivité (TDAH), à des tâches de planification, de flexibilité et d'inhibition. Les résultats de l'étude indiquent que les enfants autistes présentaient des performances moindres en planification et en flexibilité par rapport aux groupes d'enfants neurotypiques et avec un TDAH, alors que seuls les enfants avec un TDAH affichaient des performances moindres dans la tâche d'inhibition. Ceci suggère que des patrons spécifiques d'atteintes des sous-composantes des fonctions exécutives pourraient distinguer l'autisme d'autres conditions neurodéveloppementales (Hill, 2004a). Cette idée apparaît toutefois invalidée par une méta-analyse systématique contemporaine couvrant 235 études sur les fonctions exécutives en autisme et portant sur sept sous-composantes, soient la formation de concept, la flexibilité, la fluence, la planification, l'inhibition et la mémoire de travail (Demetriou *et al.*, 2018). En effet,

cette méta-analyse détecte un effet significatif de taille modéré pour des performances moindres des groupes autistes pour l'ensemble des sous-composantes étudiées. Ainsi, en moyenne, les personnes autistes ne semblent pas présenter un patron spécifique de difficultés exécutives qui permettraient un usage diagnostique discriminant. De plus, d'autres auteurs ont argumenté que les difficultés exécutives rencontrées en autisme seraient associées à la symptomatologie du TDAH et non pas aux symptômes de l'autisme (Lukito et al., 2017), ce qui questionne encore une fois la spécificité de l'hypothèse du dysfonctionnement exécutif.

Une des théories plus spécifiques à avoir été développées dans la mouvance de l'hypothèse du dysfonctionnement des fonctions exécutives est l'hypothèse, attribuable à Russell (1996), selon laquelle un déficit dans le monitoring de l'action serait à la base des difficultés socio-communicatives. Selon ce dernier, le monitoring de l'action se définit comme les mécanismes qui assurent qu'un agent reconnaît, sans auto-observation, pour quels changements perceptuels dans l'environnement il est responsable et ce à quoi il est présentement engagé (Russell & Hill, 2001). Le monitoring de l'action est toutefois un concept large qui n'est pas toujours employé avec la même définition, alors qu'une définition plus répandue le caractérise plutôt comme le processus par lequel une personne identifie et évite les erreurs dans l'exécution d'actions intentionnelles (notamment Hommel, Brown, & Nattkemper, 2016). La définition donnée par Russell semble en fait plutôt correspondre à un autre construit en sciences cognitives dont la compréhension s'est activement développée durant les deux dernières décennies, soit celui du sens de l'agentivité (SdA; voir section 1.3.3 de l'introduction ou Chapitre II pour une définition détaillée). Bien que le SdA soit plutôt situé comme un construit de l'architecture cognitive des systèmes sensorimoteurs (National Institute of Mental Health, 2019), il pourrait tout de même entretenir des liens avec les fonctions exécutives, notamment lors du monitoring des erreurs dans l'exécution d'actions intentionnelles. Les travaux de Russell ont toutefois donné naissance à une série d'études précoce sur le SdA en autisme

(Grainger, Williams, & Lind, 2014; Russell & Hill, 2001; D. Williams & Happé, 2009). Ces études ont employé des tâches expérimentales quasiment identiques, qui exigeaient de détecter, parmi des distracteurs se déplaçant sur l'écran, des cibles qui étaient sous le contrôle d'une souris d'ordinateur opérée par le participant. Ces études n'ont mis en évidence aucune différence dans les performances des enfants autistes à discriminer les cibles sous leur contrôle. Cependant, il est primordial de souligner que les tâches employées dans ces études ne prenaient pas en compte les avancées théoriques et méthodologiques réalisées dans la champ du SdA, notamment la distinction entre les niveaux implicites et explicites du SdA (Synofzik, Vosgerau, & Newen, 2008). De plus, ces tâches ne constituaient pas des tâches validées dans le champ des fonctions exécutives ou du SdA (Hill, 2004a). Ces tâches similaires semblent en effet présenter un manque de sensibilité aux particularités rencontrées dans les différents mécanismes sous-tendant le SdA. Les avancées méthodologiques dans le champ du SdA ont entre autre permis d'établir que des performances parfois équivalentes pouvaient être sous-tendues par des processus d'intégration altérés des différents types d'indices d'agentivité. Ainsi, les tâches psychophysiques employées dans les études de monitoring de l'action en autisme ne permettaient d'évaluer que les performances au niveau explicite du SdA, sans tenir compte du type d'information cognitive sur lequel les jugements de contrôle des participants étaient basés. Ces études sur le monitoring de l'action en autisme sont réexaminées dans la recension critique de la littérature sur le SdA en autisme contenue au Chapitre II.

1.2 La cognition sociale en autisme

1.2.1 Le rôle de l'étude de la cognition sociale dans la compréhension du phénotype autistique

Les sciences cognitives de l'autisme se sont donc constituées comme un champ autour de l'étude de la cognition sociale avec l'hypothèse de l'altération des capacités de Théorie de l'Esprit (Baron-Cohen et al., 1985) comme déficit primaire expliquant

les difficultés dans la sphère socio-communicative. Les limites que cette théorie rencontre, comme le manque d'universalité des atteintes en mentalisation ou le manque de pouvoir explicatif d'autres importantes manifestations cliniques de l'autisme, ont mené à l'émergence de plusieurs théories cognitives explorant une plus grande diversité de manifestations cognitives et comportementales. Les avancées dans le champ des sciences cognitives semblent donc indiquer qu'il faille s'éloigner d'une compréhension causale du phénotype autistique comme émergeant d'un déficit cognitif unitaire (Forgeot d'Arc, 2014; Forgeot d'Arc & Mottron, 2012). En effet, un nombre majoritaire d'études indiquent que les différentes manifestations comportementales autistiques (difficultés socio-communicatives, intérêts restreints et comportements répétitifs) relèvent de dimensions multiples plutôt que d'un facteur unique (Mandy & Skuse, 2008), ce qui suggère une fractionnalité des symptômes. Ainsi, plutôt que de s'opposer, les différentes théories cognitives semblent plutôt contribuer à expliquer différentes portions du phénotype cognitif et l'impact de ces différentes composantes sur les manifestations comportementales autistiques. En effet, aucun déficit cognitif n'a le pouvoir d'expliquer l'autisme complètement et explorer avec flexibilité les liens entre cognition sociale, fonctions exécutives, perception et un éventail large de manifestations cliniques, telles les particularités socio-communicatives, perceptuelles et sensorimotrices, demeure crucial pour améliorer notre compréhension de l'autisme et des différentes étiologies qui sous-tendent l'hétérogénéité du spectre (Forgeot d'Arc, 2014; Forgeot d'Arc & Mottron, 2012). La présente thèse propose en ce sens d'élargir le champ de la cognition sociale en autisme en mettant de l'avant une approche innovante qui met l'action et le SdA au centre de sa compréhension des interactions sociales et qui permet d'établir des ponts entre les manifestations saillantes de la sphère socio-communicative et les particularités sensorimotrices rencontrées en autisme.

1.2.2 Approches en cognition sociale

L'étude de la cognition sociale constitue donc un pan important du champ des sciences cognitives de l'autisme et peut permettre l'approfondissement des connaissances sur les difficultés socio-communicatives et leur lien avec d'autres aspects des phénotypes cognitif et comportemental. L'étude des particularités de la cognition sociale autistiques se sont multipliées depuis les années 80 et peuvent être globalement catégorisées selon trois approches, soit les approches axées sur la compréhension sociale, sur la perception sociale et sur la motivation sociale. Les différentes approches en cognition sociale dans le TSA mettent respectivement l'emphase sur un de ces déficits comme principal facteur limitant les interactions et comme précurseur des difficultés observées dans les autres domaines, mais tel qu'indiqué précédemment, ces différentes particularités cognitives sociales pourraient relever de mécanismes aux causes distinctes et n'être que partiellement associés.

Ainsi, l'approche axée sur la compréhension sociale soutient que c'est d'abord des difficultés dans la compréhension et la méta-représentation des croyances, des émotions et des intentions des autres qui entraînent un déséquilibre dans l'attention portée aux aspects sociaux dans l'environnement et une diminution de l'expertise sociale. Cette approche, qui trouve écho dans l'hypothèse du déficit primaire de la Théorie de l'esprit en autisme (Baron-Cohen et al., 1985) détaillée précédemment, est fondée sur l'observation de performances parfois réduites, chez les individus avec un TSA, à des tests de fausses croyances comme celui de Wimmer and Perner (1983) ou celui des Faux-Pas (Baron-Cohen, O'riordan, Stone, Jones, & Plaisted, 1999). Or, il apparaît désormais de plus en plus clair que des capacités de mentalisation réduites ne sont pas observées de façon universelle chez l'ensemble des individus avec un TSA (Bowler, 1992; Ozonoff et al., 1991; Rajendran & Mitchell, 2007). De plus, leurs performances à ces tests ne dépendent pas uniquement de processus sociaux spécifiques, mais sont influencées par des compétences comme le niveau de

développement du langage et les fonctions exécutives (Forgeot d'Arc, 2014; Frith, Morton, & Leslie, 1991; Happé, 1995a).

L'approche axée sur la perception sociale comme facteur limitant l'interaction est fondée sur un large corpus d'études examinant l'exploration et le traitement des stimuli sociaux dans l'environnement. Ces études ont toutefois mené à des conclusions mitigées sur une potentielle altération de la perception sociale chez les personnes autistes, et ce, pour une diversité de stimuli pertinents (Forgeot d'Arc & Mottron, 2012). Des difficultés à reconnaître les visages est une caractéristique souvent associée à l'autisme à la suite d'études précoces identifiant des déficits de reconnaissance des visages familiers et non-familiers chez des enfants autistes avec une déficience intellectuelle (Boucher & Lewis, 1992; Boucher, Lewis, & Collis, 1998). Cependant, plusieurs études ont depuis été menées auprès de personnes autistes sans déficience intellectuelle et, dans une revue critique de cette littérature, Jemel, Mottron, and Dawson (2006) concluent que les habiletés de reconnaissance et de traitement des visages des personnes autistes sont sous-estimées. Les auteurs notent toutefois que les personnes autistes emploieraient généralement des stratégies différentes pour réaliser les tâches d'identification et elles seraient notamment davantage orientées vers les aspects plus locaux du visage. Les particularités du traitement perceptuel des personnes autistes pourraient en ce sens entraîner un traitement moins approfondi des stimuli sociaux comme les émotions, mais il n'est pas établi que le traitement perceptuel atypique des personnes avec un TSA soit à la source de leurs difficultés de compréhension et d'orientation pour l'environnement social.

Quelques études fondées sur de petits échantillons ont en effet relevé des performances moindres chez les enfants autistes quant à la reconnaissance des émotions de base dans les visages (Celani, Battacchi, & Arcidiacono, 1999; Gross, 2004). Cependant, une étude plus récente rapporte des performances semblables entre

les enfants et adolescents autistes et neurotypiques quant à la reconnaissance des émotions de bases, comme la joie, la tristesse, etc., et des émotions sociales plus complexes comme la fierté (Tracy, Robins, Schriber, & Solomon, 2011). D'autres études s'attardant à la détection du mouvement biologique, un autre important stimulus à valeur social, étudié à partir de tâches où il faut effectuer la détection de séries de points blancs cohérents posés sur un agent biologique à travers différents types de distracteurs, ont rapporté des performances moindres chez des adultes avec un TSA dans la détection d'émotions visibles dans la posture et les mouvements (par exemple, Atkinson, 2009). Dans cette dernière étude, les habiletés de reconnaissance du mouvement biologique (sans égard aux émotions) étaient également moindres chez les personnes autistes. Des résultats discordants existent toutefois dans la littérature, notamment Rutherford and Troje (2012) qui identifient plutôt des performances préservées en détection du mouvement biologique cohérent. De plus, les performances en détection dans cette étude étaient corrélées au fonctionnement intellectuel, ce qui suggère que les personnes autistes pourraient employer des stratégies alternatives à celles employées par les personnes neurotypiques dans la réalisation de ce type de tâche. Cette suggestion apparaît cohérente avec la découverte que la détection du mouvement biologique active des réseaux cérébraux différents chez les personnes autistes (Freitag et al., 2008). En somme, la recherche sur les processus perceptifs pour les stimuli à valeur sociale en autisme est marquée par l'inconstance des résultats et pourrait refléter l'ample hétérogénéité du TSA. De plus, prises ensemble, ces données semblent indiquer qu'il existe des différences dans les trajectoires développementales des processus perceptifs qui pourraient laisser place à l'émergence de stratégies compensatoires alternatives permettant aux adultes autistes d'obtenir des performances équivalentes aux tâches expérimentales. Il semble donc pertinent de s'attarder aux particularités (cognitives, comportementales, cérébrales, etc.) rencontrées dans le traitement des stimuli sociaux chez les personnes autistes, plutôt que de se limiter à l'évaluation simple des performances à des tâches données dans le but de mettre en évidence ou d'écartier un déficit présumé. En ce sens,

l'emploi de mesures implicites (plutôt que des rapports verbaux à des tests explicites) offrant une fenêtre sur le processus de traitement de l'information qui sous-tend les performances pourrait venir désambiguïser les résultats contradictoires jusqu'ici obtenus.

Finalement, l'approche axée sur la motivation et l'orientation sociale explique les difficultés dans l'interaction par le fait que les personnes avec un TSA accordent moins de valeur à leur environnement social (Forgeot d'Arc & Mottron, 2012), moins d'intérêt et d'attention aux situations sociales, qu'elles en retirent moins de plaisir (Chevallier et al., 2012) et qu'elles affichent une orientation diminuée envers les stimuli sociaux comme les visages (Guillon, Hadjikhani, Baduel, & Rogé, 2014; Klin, Jones, Schultz, Volkmar, & Cohen, 2002). Par exemple, l'approche axée sur la motivation et l'orientation sociale suggérerait que les difficultés parfois observées chez les personnes autistes quant à la détection du mouvement biologique relèveraient d'une absence d'allocation attentionnelle spontanée aux stimuli de mouvement biologique (Annaz, Campbell, Coleman, Milne, & Swettenham, 2012) plutôt qu'à un déficit perceptif per se. Au-delà des aspects attentionnels, les personnes avec un TSA émettent également des jugements atypiques sur les visages (Forgeot d'Arc et al., 2014). Cependant, plusieurs personnes avec un TSA affichent des comportements pro-sociaux et le développement de la motivation sociale dans le TSA demeure encore peu compris (Forgeot d'Arc, 2014).

1.3 Une nouvelle approche en cognition sociale de l'autisme axée sur l'action et le sens de l'agentivité

1.3.1 Repenser l'inter-action sociale: les aspects de réciprocité

La présence de difficultés dans la communication et les interactions sociales réciproques est une manifestation cardinale du TSA. La définition diagnostique (DSM-5) met l'emphase sur les difficultés dans les aspects de réciprocité des

interactions. Paradoxalement, les principales approches en cognition sociale et autisme discutées ci-dessus expliquent les difficultés dans l'interaction par la présence d'un déficit préalable dans le traitement perceptif, la méta-représentation ou la capacité de s'orienter vers l'information sociale présente dans l'environnement externe. De façon indirecte, ces approches dépeignent l'interaction sociale comme un défi qui consiste principalement, pour un observateur passif, à assister à une scène sociale, puis à encoder et décoder l'information sociale qui y est rendue disponible. Cette conception de l'interaction sociale semble négliger les aspects de réciprocité de l'interaction, qui font appel au traitement de l'information liée à soi et au contrôle et à la conscience de l'action. En effet, les interactions sociales sont mieux comprises comme des situations dynamiques impliquant plusieurs agents qui doivent simultanément traiter l'information sociale et émettre des réponses comportementales complexes.

Nous proposons donc une approche en cognition sociale axée sur l'action et le SdA. Cette approche intègre des aspects motivationnels, sensorimoteurs, perceptifs et métacognitifs et replace au centre de sa conception de l'interaction sociale l'individu comme agent émettant des actions plutôt que comme décodeur passif d'un environnement dans lequel il n'agit pas. Une action peut être définie comme une série de mouvements qui est initiée par un agent motivé, qui est définie par un but et qui est guidée par de l'information (Von Hofsten, 2004). Les buts d'une action sont représentés sous la forme de cibles perceptuelles (Mechsner, Kerzel, Knoblich, & Prinz, 2001) et les systèmes cérébraux du contrôle de l'action et de la perception sont interdépendants (Knoblich & Flach, 2001). Les agents analysent les mouvements des autres via des représentations de leurs propres actions et l'observation de mouvements génère des programmes moteurs détectables similaires à ceux activés lorsqu'on réalise soi-même une action (Flanagan & Johansson, 2003).

L'interaction sociale et la communication –interaction dont les actions ont pour but la transmission d'un message– impliquent une dynamique d'action-perception entre deux agents ou plus. Les signaux fondamentaux de la communication, comme la parole, les pantomimes sociaux (ex. envoyer la main) et les expressions faciales, sont basés sur le mouvement (von Hofsten et Rosander, 2012). Les interactions nécessitent que l'on s'engage dans une série de mouvements complexes et entraînés et que l'on comprenne les mouvements réalisés par les autres (Beilin et Fireman, 1999). Elles nécessitent donc de distinguer les actions causées par soi des actions causées par d'autres. Les agents doivent aussi émettre des comportements adaptatifs avant que le feedback à leur propos ne soit disponible et l'interaction exige donc également des mécanismes anticipatoires de contrôle du comportement. Aussi, le traitement perceptif de l'environnement social ne dépend pas seulement des caractéristiques visuelles de la scène, mais également d'habiletés de poursuite visuelle qui se fondent sur le développement du contrôle prospectif des mouvements des yeux et de la tête (pour un exemple éloquent, voir Grynszpan et al., 2012). Les exigences de l'interaction liées au contrôle et à la conscience de l'action sont donc nombreuses et variées et constituent un véritable défi cognitif ayant le potentiel de limiter les habiletés sociales d'un individu. Pourtant, le lien entre difficultés sociales et cognition motrice (qui inclut le contrôle et les représentations de l'action) dans le TSA demeure largement sous-exploré par rapport aux autres aspects de la cognition sociale comme la Théorie de l'esprit ou la perception des stimuli sociaux, et ce, malgré la reconnaissance de plus en plus grande de l'importance des manifestations motrices cliniquement significatives en autisme (entre autres, Bhat, Landa, & Galloway, 2011; Fournier, Hass, et al., 2010; Gowen & Hamilton, 2013; Wilson, Enticott, & Rinehart, 2018).

1.3.2 Manifestations motrices du TSA

Les altérations de la motricité ne sont pas considérées comme des caractéristiques diagnostiques du TSA, mais plutôt comme des symptômes associés. Pourtant, des atypies motrices dans le TSA peuvent être observées dès l'enfance (cf. Ming, Brimacombe, & Wagner, 2007) et persistent jusqu'à l'âge adulte (cf. Hallett et al., 1993). Quelques études rétrospectives basées sur des vidéos de jeunes bambins plus tard diagnostiqués avec un TSA semblent indiquer que des signes moteurs précoce de l'autisme peuvent être identifiés dès les premiers mois après la naissance. En effet, les bambins amenés à développer un TSA semblent afficher des mouvements généraux atypiques (il s'agit de mouvements spontanés débutant chez les foetus et perdurant jusqu'à l'âge de 5 mois et qui sont générés par le tronc cérébral; Zappella et al., 2015). Ces jeunes bambins, avant même l'âge de 20 semaines, affichent également moins de symétrie dans la posture de leur tête (Gima et al., 2018) et de leur corps (Esposito, Venuti, Maestro, & Muratori, 2009) que des enfants présentant des signes autistiques temporaires mais qui développeront un trouble neurodéveloppemental autre. Certains auteurs argumentent que ces difficultés motrices précèdent l'apparition des difficultés dans la sphère socio-communicative (Bhat et al., 2011; Wilson et al., 2018). La prévalence rapportée des altérations de la motricité cliniquement significatives chez les enfants plus âgés qui ont effectivement reçu un diagnostic de TSA varie entre 51 et 100 % (Green et al., 2002; Green et al., 2009; Ming et al., 2007). Des performances moindres par rapport aux enfants au développement typique dans des batteries standardisées mesurant les habiletés de motricité fine et globale chez les enfants avec un TSA âgés de trois à 16 ans sont également observées (Green et al., 2002; Green et al., 2009; Kaur, M. Srinivasan, & N. Bhat, 2018; Liu & Breslin, 2013). Les particularités motrices rapportées dans différentes batteries standardisées comprennent des difficultés dans la motricité fine (lenteur dans les mouvements répétitifs des mains et des pieds, faible dextérité manuelle, habiletés réduites au jeu avec une balle, diadochokinésie), ainsi que de

l'hypotonie (pour une revue, voir Gowen & Hamilton, 2013; Paquet, Olliac, Golse, & Vaivre-Douret, 2016). Des difficultés avec les praxies, la coordination bi-manielle et les gnosopraxies des doigts (imitation de mouvements des doigts sans but) ont également été identifiées chez les enfants autistes (Paquet et al., 2016) et interprétées comme le reflet de difficultés de programmation des gestes. Dans une méta-analyse de 83 études portant autant sur des enfants que des adultes, Fournier *et al.* (2010) ont identifié un large effet du diagnostic de TSA sur les performances à différentes tâches de coordination motrice. Ces auteurs suggèrent d'ailleurs que les données actuelles sur la motricité dans le TSA soutiennent l'inclusion d'un déficit de la coordination motrice dans les traits cardinaux de la condition. Un nombre grandissant d'études montrent également que les enfants avec un TSA présentent des signes de dyspraxie (Dziuk et al., 2007; Gizzonio et al., 2015; Kaur et al., 2018; MacNeil & Mostofsky, 2012; Ming et al., 2007). Kaur et al. (2018) ont également observé que les difficultés praxiques chez les enfants autistes étaient associées à la sévérité de la symptomatologie autistique, et ce, indépendamment du niveau de fonctionnement intellectuel. Il existe toujours un débat sur la spécificité à l'autisme de ces signes moteurs précoces et des manifestations cliniques motrices par rapport à d'autres conditions neurodéveloppementales comme les retards de langage, le trouble déficitaire de l'attention et le trouble développemental de la coordination, alors qu'il existe un large recouvrement dans les difficultés motrices rencontrées à l'enfance dans l'ensemble de ces conditions (Hocking & Caeyenberghs, 2017; Paquet, Olliac, Golse, & Vaivre-Douret, 2019). Cependant, les difficultés motrices rencontrées dans le TSA apparaissent plus sévères (Pan, Tsai, & Chu, 2009) et plus stables au fil du développement (Van Waelvelde, Oostra, Dewitte, Van Den Broeck, & Jongmans, 2010).

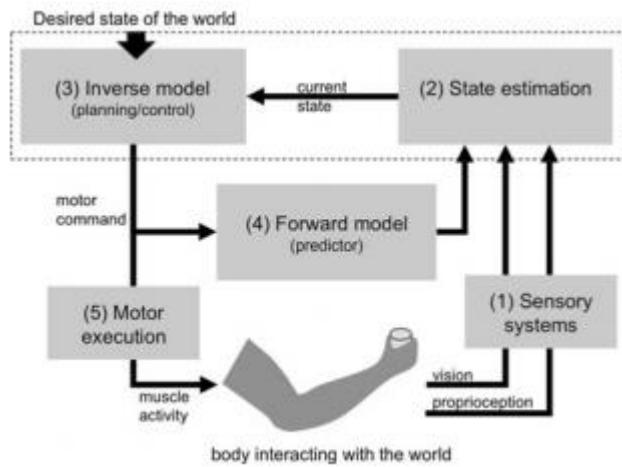


Figure 1.1 – Modèle computationnel du contrôle moteur de Wolpert et Ghahramani – Illustré par Gowen et Hamilton (2010)

Les différentes manifestations motrices observées en autisme peuvent être décortiquées et détaillées en utilisant le modèle computationnel du contrôle moteur de Wolpert and Ghahramani (2000; voir figure 1.1). Pour effectuer un mouvement (ou une action dirigée vers un but), par exemple un mouvement de préhension, un agent, qui est considéré comme un système, doit d'abord recevoir des inputs sensoriels sur la position de l'objet à saisir et sur la position de son bras dans l'espace (étape 1; voir figure 1.1). Ces informations sensorielles sont intégrées pour former une estimation de l'état du système qui comprend la relation entre l'objet ciblé et le membre (étape 2). La différence entre l'état actuel du système et l'état désiré (l'état de préhension de l'objet) est résolue par la sélection d'un modèle inverse qui transforme un but en une série de commandes motrices en permettant l'atteinte (étape 3). Ce processus comprend des sous-processus de sélection d'actions et de planification de séquences complexes de mouvements. Les commandes motrices sélectionnées à cette étape sont envoyées au membre effecteur pour qu'il réalise l'action (étape 5). Parallèlement à l'envoi d'une copie de la commande motrice à l'effecteur, une copie dite efférente, qui contient les prédictions sensorielles associées au mouvement en cours, est créée (étape 4). Cette copie efférente remplit deux fonctions. D'abord, elle permet la

correction rapide du mouvement à la suite d'erreurs qui peuvent être dues à une mauvaise planification ou à une perturbation dans l'environnement, et ce, avant même que le feedback sensoriel sur le mouvement en cours ne soit disponible ou traité. Ensuite, elle permet la comparaison entre les inputs sensoriels réels associés au mouvement (poids de l'objet sur la peau, élongation du membre) et les prédictions sensorielles qu'elle contient. Cette comparaison rend possible la mise à jour des modèles inverses (pour augmenter leur efficacité à amener le système dans son état désiré), ce qui rend possible l'apprentissage procédural. La comparaison entre les inputs sensoriels et la copie efférente constitue également un important indice d'agentivité et est centrale au fonctionnement du SdA (voir Chapitre II pour une explication détaillée). Des altérations dans plusieurs des processus computationnels du modèle de Wolpert et Ghahramani ont d'ailleurs été observées dans le TSA (pour une revue complète, voir Gowen & Hamilton, 2013).

Il a été montré que les enfants avec un TSA rencontrent des difficultés avec l'exécution de mouvements complexes sur commande verbale, comme des salutations ou les gestes associés à l'utilisation d'outils (Dziuk et al., 2007; Gizzonio et al., 2015; MacNeil & Mostofsky, 2012; Ming et al., 2007) et avec l'enchaînement d'actions (Fabbri-Destro, Cattaneo, Boria, & Rizzolatti, 2009). La dyspraxie, qui se définit comme la difficulté à réaliser une série de mouvements complexes en absence d'un déficit moteur primaire, est d'ailleurs observée chez les enfants autistes même lorsque l'on contrôle pour leurs habiletés motrices de base (Dziuk et al., 2007). Par contraste, on retrouve des altérations des habiletés motrices globales comparables chez les enfants avec un TSA et ceux avec un TDAH, mais les difficultés praxiques apparaissent comme une spécificité du TSA (MacNeil & Mostofsky, 2012).

Les personnes avec un TSA présentent également des particularités dans le contrôle prédictif (*feedforward control*; correction du mouvement à l'aide de la copie efférente) et dans les prédictions sensorielles de l'action. Dans des tâches de lever de

poids, les personnes autistes adaptent moins rapidement que les personnes neurotypiques leur mouvement à des changements dans le poids de l'objet agrippé (F. J. David et al., 2009; Schmitz, Martineau, Barthélémy, & Assaiante, 2003) (mais pour un résultat divergent, voir Gowen & Miall, 2005). Dans des tâches où il faut atteindre une cible à l'aide d'un mouvement de pincement précis avec le pouce et l'index, les enfants avec un TSA affichent une tendance à exagérer la force initiale appliquée (Z. Wang et al., 2015), ce qui suggère qu'ils éprouvent de la difficulté à utiliser la copie efférente pour corriger leur mouvement ou que les prédictions sensorielles contenues dans la copie efférente sont imprécises. Lorsque le feedback visuel devient disponible pour contribuer au maintien de la force au niveau de la cible, les enfants autistes affichent une plus grande variation dans l'amplitude de la force exercée, suggérant qu'ils éprouveraient également des difficultés dans le contrôle rétrospectif du mouvement (*feedback control*), c'est-à-dire des difficultés à utiliser le feedback sensoriel pour corriger efficacement leur mouvement en fonction de leur but.

L'apprentissage moteur repose sur des processus d'adaptation motrice dans lesquels les modèles internes de l'action (le modèle inverse et la copie efférente) sont graduellement mis à jour à partir de la comparaison entre l'input sensoriel réel et les prédictions sensorielles pour des actions données. Les études examinant l'intégrité des mécanismes d'apprentissage moteur dans le TSA affichent des résultats divergents, et ce, malgré l'utilisation de paradigmes expérimentaux parfois similaires. L'apprentissage moteur implicite a été rapporté comme intact par certaines études (Barnes et al., 2008; Brown, Aczel, Jiménez, Kaufman, & Grant, 2010; Nemeth et al., 2010), mais comme altéré par d'autres (Mosconi et al., 2013; Mostofsky, Goldberg, Landa, & Denckla, 2000). Une explication pour les divergences rencontrées pourrait être que l'apprentissage procédural des personnes avec un TSA reposeraient sur des mécanismes alternatifs à ceux rencontrés dans la population générale tout en leur permettant de réaliser des performances généralement équivalentes dans une majorité de tâches. Haswell, Izawa, Dowell, Mostofsky, and Shadmehr (2009) ont, en ce sens,

montré que, malgré des performances motrices équivalentes à celles des participants contrôles dans une tâche de préhension impliquant un bras robotique, les enfants avec un TSA sur-utilisaient l'information proprioceptive par rapport à l'information visuelle lors de la formation de leurs modèles internes de l'action. Ce biais pour l'information proprioceptive dans l'apprentissage procédural est également spécifique aux enfants avec un TSA par rapport à ceux avec un TDAH (Izawa et al., 2012). La sur-dépendance aux signaux proprioceptifs par rapport aux signaux visuels dans le contrôle moteur est également soutenue par l'observation que les enfants autistes sont moins sensibles à l'illusion de la main de caoutchouc (Cascio, Foss-Feig, Burnette, Heacock, & Cosby, 2012).

En somme, les données actuelles sur les manifestations motrices présentes dans le TSA suggèrent que des difficultés dans la coordination, la dextérité fine et les praxies sont fréquemment et durablement associées à l'autisme et constituent des manifestations cliniques importantes. Les mécanismes cérébraux et cognitifs de programmation de séquences d'action complexes ainsi que la formation de modèles internes de l'action présentent des atypies. Les corrélations identifiées entre plusieurs particularités motrices et la sévérité des symptômes autistiques semblent indiquer qu'il existe une interaction entre les manifestations motrices de l'autisme et les manifestations dans la sphère socio-communicative. Il a été récemment suggéré que des atypies dans le contrôle moteur et la cognition motrice pourraient constituer un phénotype intermédiaire pour les difficultés socio-communicatives (Casartelli, Molteni, & Ronconi, 2016; Mosconi & Sweeney, 2015). Cependant, bien qu'il semble exister un lien entre les manifestations bémaviorales motrices et sociales dans le TSA, le lien entre l'architecture de la cognition sociale et de la cognition motrice en autisme demeure peu exploré. Ainsi, nous suggérons qu'une théorie cognitive de l'autisme fondée sur le SdA pourrait permettre de mieux situer notre compréhension des particularités en cognition sociale par rapport à la diversité des particularités cognitives globales et des manifestations cliniques du TSA.

1.3.3 L'hypothèse de l'altération du sens de l'agentivité en autisme

Force est de constater que le TSA ne peut être défini uniquement à partir des critères diagnostiques du premier domaine du DSM-5. En plus des manifestations sociales qui sont les plus emblématiques de ce trouble, le TSA est caractérisé par des altérations dans plusieurs mécanismes moteurs et sensoriels. Ces altérations pourraient d'ailleurs constituer des traits cardinaux du TSA (Fournier et al., 2010) et plusieurs chercheurs défendent la nécessité d'inclure l'évaluation des difficultés motrices dans le processus d'évaluation diagnostique (Bhat et al., 2011; Wilson et al., 2018). L'approche en cognition sociale axée sur l'action et le SdA que nous proposons permet de souligner le rôle prépondérant du contrôle moteur dans l'interaction sociale. Nous proposons une hypothèse de caractérisation du profil cognitif autistique pour l'environnement social qui prend en compte cet important aspect que constituent les mécanismes cognitifs de contrôle et de conscience de l'action.

Le SdA est la capacité d'identifier que l'on est la cause d'une action ou d'une pensée (Gallagher, 2000) et de distinguer les conséquences des actions causées par soi de celles causées par les actions des autres (Balconi, 2010). L'étude du SdA offre un cadre conceptuel qui permet d'appréhender d'un même souffle les différents mécanismes de contrôle de l'action et les exigences des interactions entre plusieurs agents. Ce champ d'étude s'intéresse aux représentations et à la conscience de l'action et aux différentes subjectivités qui peuvent émerger des altérations des mécanismes qui les constituent. En ce sens, les perturbations du SdA sont étudiées en lien avec plusieurs conditions neuropsychiatriques et neurodéveloppementales, notamment la schizophrénie, dont l'étude est d'ailleurs à l'origine des principales avancées dans le domaine. Il existe quelques indications voulant que le fonctionnement du SdA soit également altéré dans le TSA (Sperduti, Pieron, Leboyer, & Zalla, 2014; Zalla, Miele, Leboyer, & Metcalfe, 2015; Zalla & Sperduti, 2015) et nous suggérons qu'une altération du SdA pourrait constituer un facteur limitant les habiletés socio-

communicatives en autisme, notamment les aspects de réciprocité qui sont soulignés dans la définition diagnostique du DSM-5. L'hypothèse d'une altération du SdA comme un des facteurs limitant les interactions sociales pourrait aussi contribuer à expliquer la présence concomitante, dans le TSA, de difficultés de coordination et de dyspraxie. Il existe d'ailleurs une association entre la sévérité des symptômes autistiques sociaux et la dyspraxie (Dziuk et al., 2007; Gizzonio et al., 2015), les altérations du contrôle prédictif et rétrospectif (Z. Wang et al., 2015) et la surdépendance à la proprioception dans la formation de modèle interne de l'action (Haswell et al., 2009).

1.4 Objectifs et hypothèses de recherche

Cette thèse a pour but principal d'établir un premier profil complet du fonctionnement du SdA dans le TSA selon l'approche de l'intégration optimale des indices d'agentivité. L'objectif secondaire est de déterminer si les particularités potentielles du fonctionnement du SdA sont liées avec les manifestations sociales et motrices de l'autisme. Pour ce faire, nous visons à 1) caractériser le profil autistique d'intégration des différents types d'indices d'agentivité (sensorimoteurs/contextuels, prospectifs/rétrospectifs) à chaque niveau d'agentivité (implicite/explicite) et 2) à explorer les corrélations potentielles entre les spécificités du SdA à chaque niveau (réduction de l'effet de couplage d'intentionnalité, sous-utilisation des indices sensorimoteurs) et les manifestations autistiques dans les sphères sociales et motrices telles que mesurées par des tests neuropsychologiques (*Reading the Mind in the Eyes Test* et *Purdue Pegboard*).

Ces objectifs seront atteints avec l'élaboration d'une tâche psychophysique innovante permettant de mesurer le niveau implicite et explicite du SdA pour une même action, ce qui constitue un défi méthodologique dans le champ du SdA, puisqu'une majorité d'études précédentes ont mesurés ces deux niveaux pour des blocs d'actions distincts.

Cette thèse s'articule donc autour de trois publications scientifiques, qui couvrent les différentes sections de la démarche de recherche proposée. Ainsi, une recension de la littérature sur les modèles du SdA et la recherche existante sur le SdA en autisme est d'abord proposée. Ensuite, une étude de validation, réalisée auprès d'un échantillon issu de la population générale, a été déployée afin de s'assurer de la sensibilité de la tâche psychophysique développée. Finalement, l'étude principale de cette thèse conclut le programme de recherche proposé dans le but de caractériser le profil du fonctionnement autistique pour le SdA en le contrastant avec un échantillon neurotypique. Cette étude sert également à évaluer s'il existe des liens entre les particularités autistiques du SdA et les manifestations sociales et motrices du TSA telles que mesurées par des tâches neuropsychologiques de reconnaissance des émotions et de dextérité fine.

1.4.1 Objectifs de la recension critique de la littérature (Chapitre II)

Les objectifs de cette recension critique de la littérature sur les modèles théoriques du SdA et sur le SdA en autisme sont de : 1) mettre en évidence les avancées théoriques offertes par l'approche de l'intégration optimale des indices d'agentivité (Moore & Fletcher, 2012; Moore, Wegner, & Haggard, 2009; Synofzik et al., 2008; Synofzik, Vosgerau, & Voss, 2013) dans l'étude du SdA, 2) de souligner les limites des études existantes sur le SdA en autisme à la lumière de ce récent cadre théorique et 3) démontrer la pertinence d'une approche en cognition sociale axée sur l'action et le SdA pour la compréhension du phénotype cognitif autistique. Pour ce faire, nous recensons et commentons les études portant sur le SdA en autisme, mais aussi un corpus d'études pertinentes qui emploient une terminologie parfois autre ou qui s'articulent autour d'un thème complémentaire au SdA, comme la motricité (développement des modèles internes de l'action, etc.) ou le traitement de l'information sociale. Nous y soulignons également les principaux enjeux

méthodologiques à prendre en considération dans le développement de la tâche psychophysique permettant la caractérisation des deux niveaux du SdA.

1.4.2 Objectifs et hypothèses de l'étude de validation (Chapitre III)

Les objectifs de l'étude de validation de la tâche psychophysique du SdA sont les suivants : 1) s'assurer que la tâche psychophysique développée affiche une sensibilité suffisante pour détecter l'effet de couplage d'intentionnalité, 2) valider que la méthodologie permet de départager les contributions relatives des différents indices d'agentivité au niveau implicite et explicite du SdA, 3) de déterminer quels sont les mécanismes à l'œuvre à chacun des niveaux du SdA lors du processus d'intégration des différents types d'agentivité dans la population générale et 4) de déterminer la contribution du SdA implicite au SdA explicite dans la population générale. Pour ce faire, cet article comprend une recension critique de la littérature sur les enjeux méthodologiques liés aux mesures du SdA et une discussion critique soulignant les forces et les limites de la méthodologie sélectionnée (altération du feedback visuel, manipulation du contexte social via des fausses croyances, méthode de la reproduction d'intervalle). Nous proposons une terminologie pour qualifier les processus d'intégration non-interactif (par addition) et interactifs (par heuristique ou potentialisation) qui facilitent la discussion des résultats obtenus.

Il a été suggéré que les indices sensorimoteurs du SdA étaient prédominants dans le processus d'intégration du niveau implicite du SdA dans la population générale (Moore & Haggard, 2008). Nous émettons donc l'hypothèse que le niveau implicite du SdA sera moins sensible aux indices contextuels que le niveau explicite et sera donc dominé par les indices sensorimoteurs prospectifs. Nous nous attendons également à ce que les indices sensorimoteurs et contextuels soient intégrés selon un mécanisme interactif (heuristique ou potentialisation) au niveau explicite. Nous nous attendons finalement à ce que le marqueur du SdA implicite employé dans la tâche

psychophysique, le couplage d'intentionnalité, soit associé aux jugements verbaux d'agentivité réalisés au niveau explicite.

1.4.3 Objectifs et hypothèses de l'étude principale (Chapitre IV)

L'objectif premier de l'étude principale de cette thèse est d'établir une première caractérisation complète du profil de fonctionnement du SdA dans le TSA selon l'approche de l'intégration optimale des indices d'agentivité. Pour ce faire, nous visons à comparer les mécanismes d'intégration des différents types d'indices à chacun des niveaux du SdA chez des échantillons de personnes autistes et de personnes neurotypique. L'objectif secondaire de cette étude est de déterminer si les particularités potentielles du SdA en autisme constituent un phénotype intermédiaire reliant les manifestations motrices et les manifestations sociales de l'autisme. Pour ce faire, nous évaluons l'intensité des manifestations sociales et motrices de l'autisme à l'aide de deux tests neuropsychologiques, soit le RMET, qui évalue les capacités de mentalisation via la reconnaissance des émotions dans les visages et le Purdue Pegboard Test, qui évalue la dextérité fine et la coordination manuelle.

Pour cette étude, nous nous attendons à retrouver les mêmes patrons d'intégration des indices d'agentivité chez l'échantillon neurotypique que ceux identifiés dans l'étude de validation. En se basant sur la littérature disponible sur le SdA en autisme, nous nous attendons à ce que l'échantillon de personnes avec un TSA présente des particularités dans le fonctionnement du SdA. Plus spécifiquement, nous prédisons que l'effet de couplage d'intentionnalité sera aboli chez les personnes autistes, en concordance avec les résultats de Sperduti et al. (2014). Nous nous attendons également à ce que les indices contextuels aient davantage de poids chez les personnes autistes dans le processus d'intégration du niveau explicite, soit lors de leurs jugements verbaux d'agentivité. Ce résultat serait compatible avec la sous-dépendance aux signaux proprioceptifs et sensorimoteurs dans le contrôle et la conscience de l'action suggérées par certaines études (Haswell et al., 2009; Zalla et

al., 2015). Finalement, nous émettons l'hypothèse qu'il existe une corrélation entre le degré d'abolition du couplage d'intentionnalité, le degré de sous-utilisation des indices sensorimoteurs au niveau explicite et l'intensité des difficultés de mentalisation et de dextérité fine.

CHAPITRE II

COGNITION SOCIALE ET SENS DE L'AGENTIVITÉ EN AUTISME : DE L'ACTION À L'INTERACTION

Publié :

Lafleur, A., Soulières, I. & Forgeot d'Arc, B. (2016). Cognition sociale et sens de l'agentivité en autisme : de l'action à l'interaction. *Santé mentale au Québec*, 41 (1), 163–181. <https://doi.org/10.7202/1036970ar>

Alexis Lafleur

B. Sc., candidat au Ph. D/D. Psy, Département de psychologie, Université du Québec à Montréal

Isabelle Soulières

Ph. D., neuropsychologue, chercheure, Centre de recherche de l'Institut universitaire en santé mentale de Montréal (CRIUSMM) – Département de psychologie, Université du Québec à Montréal

Baudouin Forgeot d'Arc

M.D., psychiatre, chercheur, Centre de recherche de l'Institut universitaire en santé mentale de Montréal (CRIUSMM) – Département de psychiatrie, Université de Montréal

RÉSUMÉ

Le sens de l'agentivité (SdA) consiste à détecter que l'on est la cause d'une action (Gallagher, 2000). Il est lié au contrôle moteur, mais également à la conscience de soi et pourrait jouer un rôle important dans l'interaction sociale. Le trouble du spectre de l'autisme (TSA) est caractérisé par une altération des interactions sociales et de la communication (DSM-5 ; APA, 2013), et est souvent perçu comme relevant d'un déficit primaire de fonctions spécifiques à la cognition sociale. Pourtant, le contrôle moteur est également altéré dans le TSA. Nous faisons l'hypothèse que les symptômes moteurs et l'atteinte de l'interaction sociale pourraient relever d'une même atteinte du SdA. Nous présentons d'abord les modèles explicatifs généraux et les bases neurofonctionnelles du SdA implicite et explicite (Synofzik et al., 2008), puis les manifestations de ses perturbations dans d'autres troubles neuropsychiatriques comme la schizophrénie. Dans le TSA, la formation atypique des modèles internes de l'action lors de l'apprentissage moteur (Haswell et al., 2009) pourrait être à l'origine de l'altération du SdA implicite. Le manque de fidélité des indices d'agentivité sensorimoteurs (Zalla et al., 2015) pourrait de façon concomitante entraîner l'altération du SdA explicite. Nous discutons les principales manifestations cliniques du TSA qui seraient reliées aux altérations du SdA (difficultés dans la théorie de l'esprit et l'imitation, déficits de la coordination et des praxies, etc.)

MOTS CLÉS

autisme, sens de l'agentivité, cognition sociale, modèles internes de l'action, interactions sociales

ABSTRACT

The sense of agency (SoA) refers to the ability for one to detect that she is the cause of an action (Gallagher, 2000). The SoA is linked to motor control but also to self-awareness and could play an important role in social interactions. Autism spectrum disorder (ASD) is characterized by an alteration of social interactions and communication (DSM-5; APA, 2013) and is often seen as a primary deficit of functions specific to social cognition. However, motor control is also altered in ASD. We hypothesize that motor symptoms and social impairments could both arise from the same alteration of SoA. We first introduce theoretical models of implicit and explicit SoA (Synofzik et al., 2008) and present their neurofunctional basis. Then, we assess the clinical expressions of a disrupted SoA in different neuropsychiatric disorders such as schizophrenia. In ASD, the atypical formation of internal models of action during motor acquisition (Haswell et al., 2009) could be at the source of an altered implicit SoA. A lack of fidelity of sensorimotor agency cues (Zalla et al., 2015) could also entail an alteration of explicit SoA. We discuss the main clinical expressions of ASD that may ensue from a disrupted SoA (difficulties in theory of mind and imitation, deficits in motor coordination and praxis, etc.)

KEYWORDS

autism, sense of agency, social cognition, internal models of action, social interactions

2.1 Introduction : la cognition sociale et les interactions en autisme

Le trouble du spectre de l'autisme (TSA) est un trouble neurodéveloppemental dont le diagnostic repose sur la présence de déficits dans la communication et les interactions sociales, ainsi que celle de patrons restreints d'intérêts et de comportements (American Psychiatric Association, 2013). Des particularités dans le traitement sensoriel et le contrôle moteur dans les TSA sont communément rapportés (cf. von Hofsten & Rosander, 2012 ; Gowen & Hamilton, 2013), mais le TSA demeure souvent perçu, à la suite de Kanner, comme «une incapacité innée à former le lien affectif usuel et biologique avec les autres personnes» (Kanner, 1943). Dans cette perspective, les études sur les bases neurocognitives du TSA suggèrent que les individus avec TSA explorent différemment les stimuli sociaux notamment les visages (cf. Guillon et al., 2014) et font des jugements atypiques sur les visages (Forgeot d'Arc et al., 2014). Ils font moins d'inférences spontanées sur les états mentaux d'autrui (Baron-Cohen et al., 1985 ; Senju et al., 2009) et ont de la difficulté à comprendre les situations sociales complexes. Ils accordent moins d'attention et d'intérêt aux situations sociales et en tirent moins de plaisir (Chevallier et al., 2012). Ainsi, le TSA est associé à un fonctionnement neurocognitif altéré dans différents aspects de la perception, de la compréhension et de la motivation pour l'environnement social. Cependant, il existe une grande hétérogénéité dans les fonctionnements individuels et un contraste encore mal compris entre les aspects altérés et préservés de la cognition sociale. De plus, l'ontogenèse de ces altérations et leur possible influence réciproque reste largement à explorer (Forgeot d'Arc & Mottron, 2012).

Les interactions sociales et la communication sont fondamentalement basées sur le mouvement (von Hofsten & Rosander, 2012). En effet, les actions fondamentales de la communication comme les signaux non verbaux et la parole sont constituées de séquences de mouvements complexes. Bien que les déficits du contrôle et de la

conscience de l'action n'appartiennent pas à la définition du TSA, ils lui sont largement associés: la présence de comportements répétitifs et de déficits dans le contrôle postural, dans la perception du mouvement biologique, dans la planification des séquences de mouvements, dans l'exécution de praxies et dans l'imitation (von Hofsten & Rosander, 2012 ; Mostofsky & Ewen, 2011) pourraient refléter l'altération du contrôle de l'action dans le TSA. Le développement de la coordination motrice est également altéré chez une large majorité des personnes avec un TSA (Fournier et al., 2010). Une altération du contrôle et de la conscience de l'action pourrait ainsi constituer un important facteur limitant les interactions sociales, puisque toute interaction exige le traitement dynamique de ses propres actions et de celles d'autres agents. En effet, distinguer les conséquences de ses actions de celles des actions des autres, synchroniser son action avec un autre agent ou reproduire des séquences de mouvements par observation sont des exigences régulières des interactions en contexte écologique. Pourtant, le rôle du contrôle de l'action et du développement moteur dans l'altération de l'interaction sociale qui caractérise le TSA demeure mal compris.

Le sens de l'agentivité (SdA) est la capacité d'identifier que l'on est la cause d'une action ou d'une pensée (Gallagher, 2000) et de distinguer les conséquences des actions causées par soi de celles causées par les actions des autres (Balconi, 2010a). Le SdA est un aspect fondamental des représentations et du contrôle de l'action. L'étude du SdA offre un cadre conceptuel qui permet de comprendre l'impact du développement du contrôle de l'action sur les interactions entre plusieurs agents. Ses perturbations sont explorées en lien avec des troubles neuropsychiatriques comme la schizophrénie, le trouble obsessionnel compulsif et le syndrome de Tourette (Balconi, 2010c). Il pourrait aussi être affecté dans le TSA. L'objet du présent article est d'explorer le rôle possible du SdA comme lien entre les altérations de la motricité et de l'interaction sociale dans le TSA. Après avoir présenté les modèles explicatifs du SdA, l'impact de ses altérations dans différents troubles neuropsychiatriques, dont la

schizophrénie, et les résultats parfois contradictoires concernant le SdA dans le TSA, nous discuterons comment une altération du SdA pourrait expliquer la présence de symptômes moteurs et sociaux dans le TSA.

2.2 Modèles explicatifs du SdA

Le SdA permet de distinguer les actions et leurs conséquences dans l'environnement qui sont autogénérées de celles qui sont générées par d'autres (Balconi, 2010a). Selon le modèle de Synofzik et al. (2008, 2009, 2013; le cadre conceptuel de l'intégration optimale des indices d'agentivité ; ci-après IOA), cette distinction peut s'opérer de façon implicite ou explicite. Le SdA implicite se limite à une représentation élémentaire de l'action comme étant causée ou non par soi. Ce processus ne conduit pas nécessairement à une représentation consciente. Le SdA explicite est en revanche une attribution causale consciente d'une action à un agent particulier. Ce processus métacognitif, qui peut être rapporté verbalement, se fonde partiellement sur le niveau implicite du SdA, mais intègre également d'autres indices (informations contextuelles, croyances préalables, etc.), qui peuvent même, selon les situations, déterminer complètement le jugement d'agentivité.

2.2.1 SdA implicite

Le modèle du comparateur (MdC) (Frith et al., 2000; Blakemore et al., 2002) offre une base explicative du niveau implicite du SdA (Synofzik & Voss, 2010; Synofzik et al., 2013). Le MdC (Figure 2.1) suggère que l'expérience d'agentivité dépend de la comparaison entre les conséquences sensorielles réelles d'une action et les conséquences sensorielles prédites par un modèle interne de l'action. Il existe en fait deux types de modèles internes de l'action : une copie efférente, forward model, qui est produite en parallèle de la commande motrice et qui contient les prédictions sensorielles de l'action, et le modèle inverse, inverse model, qui fournit au système la

commande motrice appropriée pour atteindre un état désiré. Un comparateur vérifie la correspondance entre l'état sensoriel prédit, qui est déterminé par la copie efférente, et l'état sensoriel réel de l'organisme, qui est déterminé par le feedback sensoriel. S'il y a correspondance, les conséquences de l'action sont considérées comme autogénérées et il y a émergence d'un SdA. Dans le cas d'une discordance entre ces signaux, les conséquences sensorielles sont attribuées à une source externe. Lors de l'exécution d'une nouvelle action, les cortex moteur et sensoriel produisent respectivement, un « schéma moteur » et un «schéma corporel » de l'action, qui sont intégrés dans les cortex pariétaux (Daprati et al., 2010). Le cervelet reçoit une copie de ces schémas (Ito, 2005) qui contiennent l'information sensorielle et motrice dynamique nécessaire à la production du mouvement.

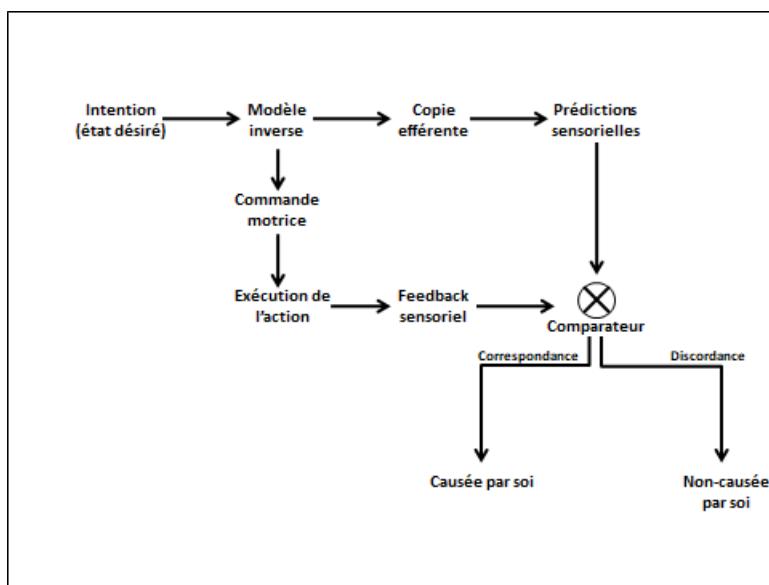


Figure 2.1 – Modèle du Comparateur (inspiré de Blakemore et al., 2002)

Le MdC prévoit donc que les mouvements autogénérés acquièrent une signature unique à travers le fonctionnement du comparateur. Tout d'abord, une convergence à ce comparateur entraîne une inhibition du feedback sensoriel prédit par la copie

efférente. Ce phénomène appelé atténuation sensorielle provoque une réduction quantifiable dans l'intensité subjective des conséquences sensorielles associées à une action autogénérée. Par exemple, l'atténuation sensorielle explique pourquoi il est difficile de se chatouiller soi-même (Blakemore et al., 2000). L'atténuation sensorielle a été identifiée dans les modalités tactile, auditive (Weiss et al., 2011) et visuelle (Cardoso-Leite et al., 2010) et constitue donc un marqueur comportemental pertinent pour mesurer les mécanismes implicites du SdA. Au cours de l'action, une divergence entre les prédictions du cervelet et les conséquences sensorielles active le cortex pariétal postérieur et le lobule pariétal inférieur (LPI) (pour une revue du rôle de ces structures dans le SdA, cf. David, 2010). La convergence entre les prédictions et le feedback sensoriel produit une atténuation sensorielle. Par exemple, les stimuli tactiles autogénérés sont associés à une réduction de l'activité du cortex somatosensoriel secondaire par rapport à une stimulation équivalente générée par une source externe (Blakemore et al., 1998). Au cours de l'apprentissage d'un comportement, les patrons de comportements sont ajustés avec la répétition (Ito, 2008). Les patrons sélectionnés sont mémorisés dans les régions motrices du cortex (Houk et al., 2007 ; Koziol et al., 2012). L'expérience du SdA implicite est également accompagnée d'une compression subjective de l'intervalle temporel séparant un mouvement volontaire et les conséquences sensorielles de ce mouvement (glissements subjectifs du temps perçu de l'action vers la conséquence et du temps perçu de la conséquence vers l'action). Cet effet appelé couplage d'intentionnalité, ou *intentional binding* (Haggard et al., 2002), surviendrait à la suite d'un groupement perceptuel entre la copie efférente et les conséquences de l'action, puisqu'il est aboli lorsque le mouvement est passif ou que les conséquences de l'action sont imprévisibles (pour une revue du couplage d'intentionnalité comme marqueur du SdA, cf. Moore & Obhi, 2012). Cet effet robuste est utilisé comme marqueur expérimental du SdA implicite. L'effet de couplage d'intentionnalité peut être aboli par inhibition de l'aire motrice supplémentaire (Moore et al., 2010). Le niveau implicite peut ne pas être directement disponible à l'expérience explicite d'agentivité,

mais des marqueurs comme l'atténuation sensorielle et le couplage d'intentionnalité permettent de l'évaluer. Enfin, le comparateur produit un indice d'agentivité dit «rétrospectif», puisqu'il implique les réafférences sensorielles et devient donc disponible seulement après l'exécution de l'action. Le SdA peut également émerger à partir d'indices sensorimoteurs «prospectifs», c'est-à-dire d'informations disponibles avant l'exécution de l'action (pour la distinction prospectif/rétrospectif, cf. Chambon et al., 2014). Ainsi, la présence d'une intention, la sélection d'une action (d'un modèle inverse) ou la simple présence d'une copie efférente peuvent suffire dans certaines circonstances à l'émergence d'un SdA (voir Figure 2.2).

2.2.2 SdA explicite

Les facteurs sensorimoteurs ne suffisent toutefois pas à expliquer le SdA dans toutes les situations (Synofzik et al., 2008, 2013). Une théorie alternative du SdA (Wegner, 2002) suggère d'ailleurs que le SdA émerge d'une inférence post-hoc issue de la concordance d'une intention et d'une conséquence sensorielle compatible à l'intention. Ainsi, un agent ayant l'intention d'un mouvement finalement exécuté par un tiers peut faussement s'en croire l'auteur (Wegner et al., 2004). D'autres indices contextuels rétrospectifs peuvent également contribuer au SdA: les individus peuvent, par exemple, s'autoattribuer une action pour laquelle ils n'ont pas expérimenté de SdA implicite lorsqu'ils sont les seuls agents présents dans l'environnement. De plus, les croyances préalables de l'individu (p. ex. croyance en l'existence d'agents invisibles, connaissance de l'environnement, etc.), la valence émotionnelle des conséquences de l'action, la performance perçue et certains traits de personnalité (p. ex. le locus de contrôle) peuvent influencer les attributions d'agentivité (Figure 2.2). Ainsi l'émergence du SdA explicite repose-t-elle sur les indices sensorimoteurs prospectifs et rétrospectifs, ainsi que les indices contextuels rétrospectifs, et ces indices sont pondérés pour l'émergence d'un SdA au niveau explicite (Chambon et al., 2014; Zalla & Sperduti, 2015) selon leur disponibilité ou

les exigences particulières d'un contexte donné (Synofzik et al., 2008, 2013). Le IOA propose de concilier le MdC et le modèle des inférences post-hoc comme sources du SdA explicite. L'expérience d'agentivité est déterminée, selon le IOA, par l'intégration de ces deux classes d'indices et leur contribution relative varie en fonction de leur disponibilité et de leur fidélité dans un contexte donné. Plusieurs marqueurs, obtenus par rapport verbal, sont employés pour examiner le niveau explicite du SdA. L'attribution d'agentivité

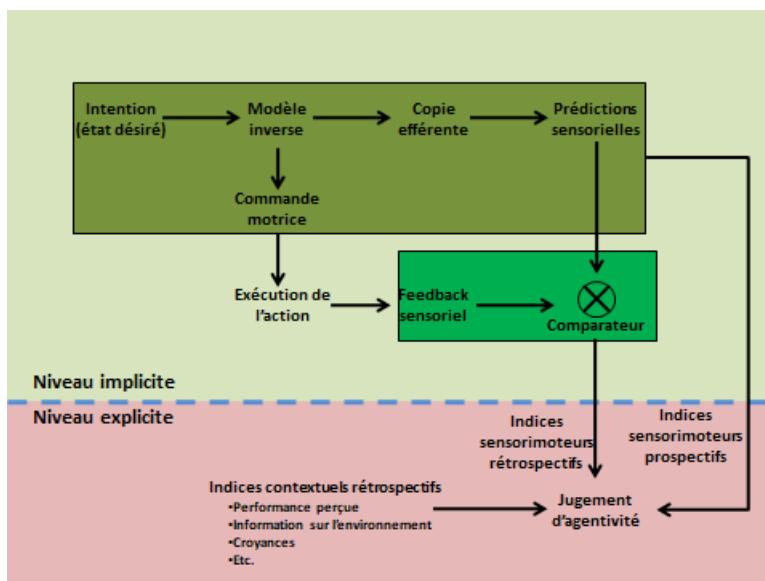


Figure 2.2 – Niveaux implicite et explicite du SdA – Inspiré de Blakemore et al., 2002; Synofzik et al., 2013 et Zalla et Sperduti, 2015

soi-même après l'exécution d'une action (p. ex. David, 2008), les jugements d'autocausalisation ou de contrôle sur une échelle de Likert (p. ex. Miele et al., 2011) constituent différents types de jugements d'agentivité (JdA) qui permettent de quantifier le SdA explicite. Des tests de mémoire de l'action et de monitoring de source (p. ex. Zalla et al., 2010) peuvent également mesurer indirectement le SdA. Ces mesures ne distinguent généralement pas les contributions relatives des indices sensorimoteurs implicites et des indices contextuels rétrospectifs dans l'émergence du

SdA explicite. Les jugements explicites sont associés à l'activation du cortex préfrontal antérieur gauche et du cortex orbitofrontal droit (Miele et al., 2011), généralement impliqués dans le traitement des informations sensorielles et affectives relatives à soi. Selon une méta-analyse de 15 études en imagerie cérébrale (Sperduti et al., 2011), les JdA autoattribués seraient associés à l'activité de l'insula (bilatérale) et les attributions externes à celle de la jonction temporo-pariétale, du cortex préfrontal dorso-médian et de la préaire motrice supplémentaire. La discordance entre les prédictions et les conséquences sensorielles activerait la jonction temporo-pariétale, tandis que le traitement autoréférentiel, les décisions sous incertitude, l'accès conscient de la discordance prédictions/conséquences seraient associés à l'activité du cortex préfrontal dorso-médian (David, 2010). La préaire motrice supplémentaire signalerait une disparité entre les intentions motrices et les conséquences de l'action (Sperduti et al., 2011).

2.2.3 Perturbations du SdA

Plusieurs symptômes neurologiques sont généralement considérés comme des atteintes du SdA: syndrome de la main alien, comportements d'utilisation, anosognosie, etc. (Frith et al., 2000 ; Balconi, 2010b). Le SdA serait également perturbé dans plusieurs troubles neuropsychiatriques comme le trouble obsessionnel compulsif, le syndrome de Tourette et le TSA (Balconi, 2010b), mais son étude en lien avec les troubles neuropsychiatriques s'est d'abord imposée en schizophrénie. Les modèles du SdA permettent d'expliquer les symptômes positifs de la schizophrénie comme les illusions de référence, les illusions de contrôle et les hallucinations acoustico-verbales (Georgieff & Jeannerod, 1998; Frith et al., 2000; Synofzik & Voss, 2010). L'étude du SdA dans la schizophrénie est aussi à la source de nombreuses avancées théoriques récentes comme la distinction entre niveaux implicite et explicite (Synofzik et al., 2008). Dans la schizophrénie, le SdA implicite est altéré : en effet, des prédictions imprécises des conséquences sensorielles de

l'action entraînent une réduction de l'atténuation sensorielle (Shergill et al., 2005). De même, lors d'une action aux conséquences fréquentes, mais inconstantes (75% des actions), un couplage d'intentionnalité est habituellement présent chez la population générale que la conséquence de l'action survienne ou non, suggérant que le SdA peut émerger de l'anticipation de la conséquence. Chez les individus avec schizophrénie, en revanche, le couplage d'intentionnalité est présent – et même augmenté – uniquement dans les essais où la conséquence sensorielle survient (Voss et al., 2010). Ainsi, chez les personnes avec schizophrénie, le SdA implicite dépend excessivement d'indices sensorimoteurs rétrospectifs et repose moins sur des indices sensorimoteurs prospectifs. L'altération du SdA implicite affecte le SdA explicite. L'IOA offre une base explicative contexte-dépendante des différentes erreurs d'attribution d'agentivité dans les troubles psychotiques: les prédictions sensorielles des conséquences de l'action (indices prospectifs) étant imprécises, le jugement d'agentivité se base davantage sur des indices alternatifs d'agentivité comme le feedback visuel et auditif, les croyances préalables et les inférences rétrospectives (Synofzik & Voss, 2010). Cette pondération accrue pour les indices rétrospectifs compenserait les prédictions imprécises des conséquences sensorielles de l'action, mais entraînerait certaines erreurs dans les contextes où les indices rétrospectifs alternatifs sont trompeurs ou absents, conduisant respectivement à s'autoattribuer (illusion de référence) ou se sous-attribuer (illusion de contrôle) la cause de l'action. L'intensité des hallucinations acoustico-verbales, des illusions de référence et des illusions de contrôle chez les patients schizophrènes est d'ailleurs corrélée avec le déficit de prédiction des conséquences de l'action qu'ils affichent (Voss et al., 2010).

2.3 Le SdA dans le TSA

Au cours du développement typique, la sensibilité à sa propre agentivité apparaît entre 9 et 18 mois (Johnson, 2003). Permettant d'établir une distinction claire entre soi et l'autre, elle pourrait être un préalable à l'attribution d'intentions et d'autres

états mentaux (Pacherie, 1997) et à l'imitation (Nadel 2004). Ainsi, une altération précoce du SdA pourrait avoir un impact sur le développement de l'imitation et de l'attribution d'états mentaux (Russell, 1996). Comme les habiletés sociales nécessitent à la fois de s'engager dans une série de mouvements et de comprendre les mouvements des autres (ainsi que les intentions qui leur sont associées) (Beilin & Fireman, 1999), une altération des mécanismes du contrôle et de la conscience de l'action pourrait également limiter les interactions sociales et rendre difficile la communication. Dans le TSA, les troubles moteurs pourraient donc constituer, plutôt qu'un épiphénomène, un facteur causal de la réciprocité sociale altérée. Pourtant, peu d'études ont investigué le SdA dans l'autisme et son impact sur l'interaction sociale. Notons dès lors que, bien que le TSA présente une certaine comorbidité avec la déficience intellectuelle, la large majorité des études disponibles sur le SdA et sur les représentations de l'action en autisme ont été menées auprès d'une sous-population de personnes avec un diagnostic de TSA et un fonctionnement intellectuel normal.

2.3.1 SdA implicite

Dans l'unique étude sur l'atténuation sensorielle dans le TSA (Blakemore et al., 2006), des participants soumis au contact léger d'une éponge avec leur paume rapportaient (sur une échelle de 0 à 10) la sensation de chatouillement et l'intensité perçue. Les participants des 2 groupes rapportaient un chatouillement plus important lorsque la stimulation était activée par un tiers, mais la réduction de la perception d'intensité du stimulus provoqué par un tiers (atténuation sensorielle) n'était rapportée que par le groupe contrôle. La discordance entre ces 2 mesures subjectives incite à investiguer davantage l'atténuation sensorielle dans le TSA à l'aide de mesures objectives comme celles utilisées en schizophrénie (p. ex. Shergill et al., 2005). Récemment, le couplage d'intentionnalité a été rapporté intact dans le TSA pour la modalité auditive et la condition multimodale, mais aboli dans la modalité visuelle (Sperduti et al., 2014), ce qui suggère une altération des indices

sensorimoteurs à contenus visuels du SdA. Cette altération du couplage d'intentionnalité diffère de celle observée chez les schizophrènes, alors que ces derniers montrent plutôt un renforcement du couplage d'intentionnalité lorsque des indices sensorimoteurs rétrospectifs sont disponibles (Voss et al., 2010). Dans l'autisme, les contributions respectives des indices prospectifs et rétrospectifs au patron atypique de couplage d'intentionnalité observé demeurent à explorer. Il existe dans le TSA une association excessive entre l'action et ses conséquences proprioceptives, qui est corrélée avec l'intensité des symptômes sociaux (imitation, etc.) et moteurs (praxies, etc.) (Haswell et al., 2009). Ainsi, lors de l'apprentissage d'un nouveau mouvement, les enfants autistes acquièrent des modèles internes de l'action qui surdépendent de l'information proprioceptive par rapport à l'information visuelle. Cette particularité dans la formation de modèles internes de l'action, qui est spécifique au TSA (par rapport au trouble de l'attention) (Izawa et al., 2012), concorde avec la découverte que l'intégration multisensorielle est affectée chez les personnes avec un TSA et que leur mode de traitement est davantage unimodal (Collignon et al., 2013). De plus, la surdépendance au signal proprioceptif dans la formation de modèles internes semble constituer une importante différence entre les personnes avec un TSA et celles avec schizophrénie. En effet, les personnes schizophrènes dépendent excessivement du signal réafférent visuel et des indices rétrospectifs dans l'adaptation de leurs mouvements et dans l'émergence de leur SdA (Synofzik & Voss, 2010; Synofzik et al., 2010). La surdépendance au signal proprioceptif des personnes avec un TSA dans la formation de modèles internes de l'action suggère que les indices sensorimoteurs visuels prospectifs et rétrospectifs pourraient ne pas être disponibles pour contribuer à leur SdA implicite. Cette difficulté à se représenter l'action dans la modalité visuelle pourrait être à la source de leurs difficultés dans l'imitation (Mostofsky & Ewen, 2011). La surdépendance à la proprioception pourrait être expliquée par une connectivité cérébrale altérée, plus précisément par une surconnectivité locale et par une sous-connectivité globale (Mostofsky & Ewen, 2011 ; mais pour l'hypothèse d'une connectivité idiosyncratique

dans le TSA, cf. Hahamy et al., 2015). La formation de modèles internes basée sur le signal proprioceptif se réaliserait par l’entremise de connexions de courte distance en raison de la proximité spatiale entre les cortex somatosensoriel et moteur. En revanche, l’utilisation du feedback visuel dans la constitution des modèles internes nécessiterait plutôt des connexions de longue distance. Le fait que le volume de matière blanche locale dans le cortex moteur chez les enfants avec un TSA est un facteur prédictif robuste des déficits moteurs (Mostofsky et al., 2007) vient appuyer cette hypothèse. Le cervelet joue également un rôle majeur dans la formation des modèles internes et constitue une des régions cérébrales les plus systématiquement identifiées comme présentant des anomalies chez les personnes avec un TSA (Fatemi et al., 2012). L’activation cérébelleuse est d’ailleurs atypique chez les personnes avec un TSA lors de l’exécution de divers mouvements (Mostofsky et al., 2009) et de mouvements oculaires (Takarae et al., 2007). Enfin, l’abolition du couplage d’intentionnalité dans la modalité visuelle constitue une première preuve de l’altération du SdA implicite dans le TSA. Cette altération coïncide avec une association excessive entre l’action et les conséquences proprioceptives (par rapport à visuelles) lors de la formation de modèles internes. Il reste toutefois à déterminer, pour le TSA, si l’altération du SdA implicite est attribuable à une altération des indices sensorimoteurs prospectifs et/ou rétrospectifs. Ceci pourrait être vérifié par l’emploi en TSA de paradigmes déjà utilisés en schizophrénie (p. ex. Voss et al., 2010), mais cette vérification doit être effectuée en distinguant les modalités visuelle, auditive et somatosensorielle (proprioceptive et tactile). De plus, l’atténuation sensorielle dans le TSA reste à explorer dans l’ensemble des modalités, alors que le couplage d’intentionnalité n’a jamais été testé dans une modalité somatosensorielle.

2.3.2 SdA explicite

Le monitoring de source (la capacité d’associer explicitement dans un test de mémoire les différents auteurs d’une série d’actions) semble préservé chez les

personnes avec TSA (Hill & Russell, 2002; Williams & Happé, 2009; Grainger et al., 2014; Zalla et al., 2010, mais cf. Russell & Jarrold, 1999 pour un résultat divergent). Cependant, le bénéfice de mémoire en rappel libre habituellement associé aux actions autogénérées n'est pas retrouvé chez les individus avec TSA (Zalla et al., 2010; Hare et al., 2007). Ces mesures différées du SdA demeurent cependant difficiles à interpréter, puisque le lien entre mémoire et SdA est encore mal compris et qu'il est ardu, dans ces paradigmes, d'évaluer les contributions respectives des différents indices d'agentivité. Ayant testé plus directement le SdA explicite par le biais d'attributions d'agentivité (soi-autre) effectuée essai par essai lors d'une tâche d'atteinte de cibles, David et al. (2008) n'ont pas identifié de différence entre personnes avec un TSA et les participants contrôles. Comme le feedback visuel donné au participant durant cette tâche était imprévisible et que les distorsions du feedback n'étaient pas contrôlées de façon paramétrique, la contribution des indices sensorimoteurs (autant prospectifs que rétrospectifs) ne pouvait être évaluée et il est possible que le SdA explicite ait été préservé par une utilisation adéquate des indices contextuels rétrospectifs. En ce sens, Zalla et al. (2015) ont montré que les personnes avec un TSA, malgré des performances préservées en JdA (évalué sur une échelle continue), sous-utilisent, par rapport aux contrôles, les indices sensorimoteurs quand elles rapportent un SdA explicite. Dans cette expérience, si les sujets typiques utilisaient la disparité entre la prédiction de la conséquence visuelle et le feedback visuel (altéré) pour établir leur JdA, les JdA des participants avec un TSA se fondaient sur les indices contextuels rétrospectifs. Il est à noter que la disparité était détectable dans la modalité visuelle seulement (et non pas proprioceptive). La formation atypique des modèles internes pourrait résulter en une faible sensibilité du comparateur à la disparité visuelle et/ou en l'absence de prédictions des conséquences visuelles de l'action sur lesquelles fonder un SdA explicite et expliquer pourquoi les indices contextuels sont préférés aux indices sensorimoteurs. Le SdA explicite serait donc préservé chez les personnes avec un TSA lorsque le contexte permet l'utilisation d'indices rétrospectifs (Zalla & Sperduti, 2015), mais l'altération du SdA implicite

entraînerait une pondération atypique des indices d'agentivité. L'étude de Zalla et al. (2015) a également montré que moins les personnes autistes fondaient leurs JdA sur les indices sensorimoteurs, moins leur score de performance dans un test de théorie de l'esprit (Faux-Pas) était élevé. Ces particularités du SdA dans l'autisme pourraient donc avoir un impact sur les habiletés sociales. En ce sens, une altération du SdA pour les mouvements oculaires chez les personnes avec un TSA a été associée à une compréhension réduite des interactions sociales dans le contexte écologique d'une conversation (Grynszpan et al., 2012).

2.4 Conclusion

Le SdA semble donc présenter plusieurs atypies dans le TSA : les mécanismes sensorimoteurs à la source du niveau implicite du SdA sont altérés et la formation des modèles internes de l'action s'appuie excessivement sur l'information proprioceptive aux dépens de l'information visuelle. Toutefois, l'intégration pondérée de différents indices d'agentivité (dont les indices sensorimoteurs prospectifs et rétrospectifs, mais également les indices contextuels rétrospectifs comme les croyances préalables ou la performance perçue) semble avantager l'utilisation d'indices rétrospectifs dans le TSA. Une majorité d'études portant sur la métacognition d'agentivité chez les personnes avec un TSA ne distinguent toutefois pas l'influence de ces divers indices, ce qui pourrait être à l'origine des résultats contradictoires quant à l'intégrité du SdA dans le TSA. Ainsi, il a été suggéré que le rôle prépondérant des indices rétrospectifs dans l'émergence d'un SdA explicite pourrait être occasionné par un manque de fidélité des indices prospectifs (Zalla & Sperduti 2015), mais cette hypothèse reste à valider. Aussi, des travaux récents suggèrent un lien entre SdA et interaction sociale dans le TSA (Grynszpan et al., 2012; Zalla et al., 2015). Ces résultats, combinés aux travaux sur la formation des modèles internes de l'action dans le TSA (Haswell et al., 2009 ; Izawa et al., 2012), semblent suggérer une implication de l'altération du SdA dans la présence concomitante de déficits de la motricité et de l'interaction sociale.

Les recherches à venir devront: 1) comprendre les divergences observées avec différentes mesures du SdA implicite (atténuation sensorielle, couplage d'intentionnalité) en fonction des différentes modalités sensorielles; 2) distinguer l'intégrité du SdA implicite de la compensation par un SdA explicite (basé sur des indices contextuels) en isolant les contributions des indices sensorimoteurs prospectifs et rétrospectifs puis contextuels rétrospectifs, notamment en quantifiant simultanément pour une même action le SdA implicite et explicite ; 3) établir un lien de causalité direct entre un marqueur témoignant d'une altération du SdA et différents indicateurs du fonctionnement social (théorie de l'esprit, imitation, etc.) et moteur (praxies, etc.). De cette manière, une étude plus intégrée des différents aspects du SdA et de la cognition sociale pourrait contribuer à une meilleure compréhension des symptômes sociaux et des symptômes moteurs, qui coexistent dans le TSA.

RÉFÉRENCES

- American Psychiatric Association. (2013) *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders* (5e ed.). Washington, DC: American Psychiatric Association Publishing.
- Balconi, M. (2010a). *The sense of Agency in Psychology and Neuropsychology*. Dans M. Balconi (Ed.), *Neuropsychology of the Sense of Agency : From Consciousness to Action* (3-22). New York, NY: Springer.
- Balconi, M. (2010b). *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.
- Baron-Cohen, S., Leslie, A. M. & Firth, U. (1985). *Does the autistic child have a "theory of mind"?* Cognition, 21(1), 37-46.

Beilin, H. & Fireman, G. (1999). *The foundation of Piaget's theories: mental and physical action*. Advances in Child Development and Behavior, 27, 221-46.

Blakemore, S. J., Tavassoli, T., Calo, S., Thomas, R. M., Catmur, C., Frith, U. & Haggard, P. (2006). *Tactile sensitivity in Asperger syndrome*. Brain and Cognition, 61, 5-13.

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. M. & Frith, C. D. (2002). *Abnormalities in the awareness of action*. Trends in Cognitive Sciences, 6, 237-242.

Blakemore, S. J., Wolpert, D. & Frith, C. (2000). *Why can't you tickle yourself?* Neuroreport. 11. R11-R16.

Cardoso-Leite, P., Mamassian, P., Schütz-Bosbach, S. & Waszak, F. (2010). *A new look at sensory attenuation. Action-effect anticipation affects sensitivity, not response bias*. Psychological Science, 21(12), 1740-1745.

Chambon, V., Sidarus, N. & Haggard, P. (2014). *From action intentions to action effects: how does the sense of agency come about?* Frontiers in Human Neuroscience, 320(8), 1-9.

Chevallier, C., Grezes, J., Molesworth, C., Berthoz, S. & Happé, F. (2012) *Brief report: selective social anhedonia in high functioning autism*. Journal of Autism and Developmental Disorders, 42, 1504-1509.

- Collignon, O., Charbonneau, G., Peters, F., Nassim, M., Lassonde, M., Lepore, F., ... Bertone, A. (2012). *Reduced multisensory facilitation in persons with autism*. Cortex, 49 (6), 1-7.
- Daprati, E., Sirigu, A. & Nico, D. (2010). *Body and movement: consciousness in the parietal lobes*. Neuropsychologia, 48, 756-762.
- David, N., Gawronski, A., Santos, N. S., Huff, W., Lehnhardt, F.-G., Newen, A. & Vogeley, K. (2008). *Dissociation Between Key Processes of Social Cognition in Autism: Impaired Mentalizing But Intact Sense of Agency*. Journal of Autism and Developmental Disorders, 38, 593-605.
- 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.
- Fatemi, S. H., Aldinger, K. A., Ashwood, P., Bauman, M. L., Blaha, C. D., Blatt, G. J., ... Welsh, J. P. (2012). *Consensus Paper: Pathological role of the cerebellum in autism*. Cerebellum, 11, 777-807.
- Forgeot d'Arc, B. & Mottron, L. (2012) *Social Cognition in Autism*. Dans V. Anderson & M. Beauchamp (Eds), *Developmental Social Neuroscience and Childhood Brain Insult: Implications for Theory and Practice* (299-324). New York, NY: Guilford Press.
- Forgeot d'Arc, B., Ramus, F., Lefebvre, A., Brottier, D., Zalla, T., Moukawane, S., ... Delorme, R. (2014). *Atypical Social Judgment and Sensitivity to Perceptual Cues in Autism Spectrum Disorders*. Journal of Autism and Developmental Disorders. doi: 10.1007/s10803-014-2208-5

Fournier, K. A., Hass, C. J., Naik, S. K., Lodha, N. & Cauraugh, J. H. (2010). *Motor Coordination in Autism Spectrum Disorders: A Synthesis and Meta-Analysis*. Journal of Autism and Developmental Disorders, 40, 1227-1240.

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

Gallagher, S. (2000). *Philosophical conceptions of the self: implications for cognitive science*. Trends in Cognitive Sciences, 4, 14-21.

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.

Gowen, E. & Hamilton, A. (2013). *Motor abilities in Autism: A Review Using a Computational Context*. Journal of Autism and Developmental Disorders, 43(2), 323-344.

Grainger, C., Williams, D. M. & Lind, S. E. (2014). *Online action monitoring and memory for self-performed actions in autism spectrum disorder*. Journal of Autism and Developmental Disorders, 44, 1193-1206.

Grynszpan, O., Nadel, J., Martin, J.-C., Simonin, J., Bailleul, P., Wang, Y., ... Constant, J. (2012). *Self-Monitoring of Gaze in High Functioning Autism*. Journal of Autism and Developmental Disorders, 42, 1642-1650.

- Guillon, Q., Hadjikhani, N., Baduel, S. & Rogé, B. (2014). *Visual social attention in autism spectrum disorder: Insights from eye-tracking studies*. Neuroscience and Behavioral Reviews, 42, 279-297.
- Haggard, P., Aschersleben, G., Gehrke, J. & Prinz, W. (2002) *Action, binding, and awareness*. Dans W. Prinz & B. Hommel (Eds), *Common Mechanisms in Perception and Action: Attention and Performance*, XIX(226-285). Oxford, UK: Oxford University Press.
- Hahamy, A., Behrmann, M. & Balach, R. (2015). *The idiosyncratic brain: distortion of spontaneous connectivity patterns in autism spectrum disorder*. Nature Neuroscience, 18(2), 302-309.
- Hare, D. J., Mellor, C., & Azmi, S. (2007). *Episodic memory in adults with autistic spectrum disorders: recall for self- versus other-experienced events*. Research in Developmental Disabilities, 28(3), 317-329.
- Haswell, C. C., Izawa, J., Dowell, L. R., Mostofsky, S. H. & Shadmehr, R. (2009). *Representation of internal models of action in the autistic brain*. Nature Neuroscience, 12(8), 970-972.
- Hill, E. L. & Russell, J. (2002). *Action memory and self-monitoring in children with autism: Self versus other*. Infant and Child Development, 11, 159-170.
- Houk, J. C., Bastianen, C., Fansler, D., Fishbach, A., Fraser, D., Reber, P. J., ... Simo, L. S. (2007). *Action selection and refinement in subcortical loops through basal ganglia and cerebellum*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences, 362, 1573-1583.

- Ito, M. (2005). *Bases and implications of learning in the cerebellum--adaptive control and internal model mechanism*. Progress in Brain Research, 148, 95-109.
- Ito, M. (2008). *Control of mental activities by internal models in the cerebellum*. Nature Reviews Neurosciences, 9, 304-313.
- Izawa, J., Pekny, S. E., Marko, M. K., Haswell, C. C., Shadmehr, R. et Mostofsky, S. H. (2012) *Motor Learning Relies on Integrated Sensory Inputs in ADHD, but Over-Selectively on Proprioception in Autism Spectrum Disorder*. Autism Research, 5, 124-136.
- Johnson, S. C. (2003). *Detecting agents*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences, 358, 549-559.
- Koziol, L. F., Budding, D. E. & Chidekel, D. (2012). *From movement to thought: executive function, embodied cognition, and the cerebellum*. Cerebellum, 11, 505-525.
- Miele, D. B., Wager, T. D., Mitchell, J. P., M & Metcalfe, J. (2011). *Dissociating Neural Correlates of Action Monitoring and Metacognition of Agency*. Journal of Cognitive Neuroscience, 23(11). 3620-3636.
- Moore, J. W. & Obhi, S. S. (2012). *Intentional binding and the sense of agency : a review*. Consciousness and Cognition, 21(1). 546-561.
- Moore, J. W., Ruge, D., Wenke, D., Rothwell, J. & Haggard, P. (2010). *Disrupting the experience of control in the human brain: pre-supplementary motor area contributes to the sense of agency*. Proceedings of the Royal Society B, 277, 2503-2509.

Mostofsky, S. H., Burgess, M. P. & Gidley Larson, J. C. (2007). *Increased motor cortex white matter volume predicts motor impairment in autism*. Brain, 130, 2117-2122.

Mostofsky, S. H. & Ewen., J. B. (2011). *Altered connectivity and action model formation in autism is autism*. The Neuroscientist, 17(4), 437-448.

Mostofsky, S. H., Powell, S. K., Simmonds, D. J., Goldberg, M. C., Caffo, B. et Pekar, J. J. (2009) *Decreased connectivity and cerebellar activity in autism during motor task performance*. Brain, 132, 2413-2425.

Nadel, J. (2004). *Early imitation and the emergence of a sense of agency*. Paper presented at the 4th International Workshop on Epigenetic Robotics: Modeling Cognitive Development in Robotic Systems. Genoa, Italy.

Pacherie, E. (1997). *Motor images, self-consciousness and autism*. Dans J. Russell (Éd.), *Autism as an executive disorder* (215-255). Oxford, UK: Oxford University Press.

Russell, J. (1996). *Agency : Its Role in Mental Development*. Hove, UK: Lawrence Erlbaum Associates Ltd.

Russell, J. & Jarrold, C. (1999). *Memory for actions in children with autism: Self versus other*. Cognitive Neuropsychiatry, 4, 303-331.

Senju, A., Southgate, V., White, S. & Frith, U. (2009). *Mindblind Eyes: An Absence of Spontaneous Theory of Mind in Asperger Syndrome*. Science, 325, 883-885.

Shergill, S. S., Samson, G., Bays, P. M., Frith, C. D. & Wolpert, D. M. (2005). *Evidence for Sensory Prediction Deficits in Schizophrenia*. American Journal of Psychiatry, 162, 2384-2386.

Sperduti, M., Delaveau, P., Fossati, P. & Nadel, J. (2011) *Different brain structures related to self- and external-agency attribution: a brief review and metaanalysis*. Brain Structure and Function, 216. 151-157.

Sperduti, M., Pieron, M., Leboyer, M. & Zalla, T. (2014) *Altered Pre-Reflective Sense of Agency in Autism Spectrum Disorders as Revealed by Reduced Intentional Binding*. Journal of Autism and Developmental Disorders, 44(343), 343-352.

Synofzik, M., Vosgerau, G. & Lindner, A. (2009). *Me or not me--an optimal integration of agency cues?* Consciousness and Cognition, 18(4), 1065-1068.

Synofzik, M., Vosgerau, G. & Newen, A. (2008). *Beyond the comparator model : a multifactorial two-step account of agency*. Consciousness and Cognition, 17(1), 219-239.

Synofzik, M., Vosgerau, G. & Voss, M. (2013). *The experience of agency : an interplay between prediction and postdiction*. Frontiers in Psychology, 127(4), 1-8.

Synofzik, M. & Voss, M. (2010). *Disturbances of the Sense of Agency in Schizophrenia*. Dans Balconi (Ed.), *Neuropsychology of the Sense of Agency : From Consciousness to Action* (145-156). New York, NY: Springer. Takarae, Y., Minshew, N. J., Luna, B. & Sweeney, J. A. (2007) *Atypical involvement of frontostriatal systems during sensorimotor control in autism*. Psychiatry Research, 156(2), 117-27.

von Hofsten, C. & Rosander, K. (2012). *Perception-action in children with ASD*. Frontiers in Integrative Neuroscience, 6(115), 1-6.

Voss, M., Moore, J., Hauser, M., Gallinat, J., Heinz, A. & Haggard, P. (2010). *Altered awareness of action in schizophrenia : a specific deficit in predicting action consequences*. Brain, 133, 3104-3112.

Wegner, D. M. (2002). *The illusion of Conscious Will*. Cambridge, MA: MIT Press.

Wegner, D. M., Sparrow, B. & Winerman, L. (2004). *Vicarious agency : experiencing control over the movements of others*. Journal of Personality and Social Psychology, 86(6), 838-848.

Weiss, C., Herwig, A. & Schütz-Bosbach, S. (2011). *The self in action effects: Selective attenuation of self-generated sounds*. Cognition, 121, 207-218.

Williams, D. & Happé, F. (2009). *Pre-Conceptual Aspects of Self-Awareness in Autism Spectrum Disorder: The Case of Action-Monitoring*. Journal of Autism and Developmental Disorders, 39, 251-259.

Zalla, T., Daprat, E., Sav, A.-M., Chaste, P., Nico, D. & Leboyer, M. (2010). *Memory for Self-Performed Actions in Individuals with Asperger Syndrome*. PLoS One, 5(10), e13370.

Zalla, T., Miele, D., Leboyer, M. & Metcalfe, J. (2015). *Metacognition of agency and theory of mind in adults with high functioning autism*. Consciousness and Cognition, 31, 126-138.

Zalla, T. & Sperduti, M. (2015). *The sense of agency in autism spectrum disorders: a dissociation between prospective and retrospective mechanisms?* Frontiers in Psychology, 1278(6), 1-7

CHAPITRE III

SENSE OF AGENCY: SENSORIMOTOR SIGNALS AND SOCIAL CONTEXT ARE DIFFERENTIALLY WEIGHED AT IMPLICIT AND EXPLICIT LEVELS

Publié :

Lafleur, A., Soulières, I., & Forgeot d'Arc, B. (2020). *Sense of agency: Sensorimotor signals and social context are differentially weighed at implicit and explicit levels.* Consciousness and Cognition, 84, 103004. doi:10.1016/j.concog.2020.103004

Alexis Lafleur
Isabelle Soulières
Département de psychologie, Université du Québec à Montréal

Baudouin Forgeot d'Arc
Département de psychiatrie, Université de Montréal

ABSTRACT

Sense of agency (SoA) describes the experience of being the author of an action. Cue integration approaches divide SoA into an implicit level, mostly relying on prospective sensorimotor signals, and an explicit level, resulting from an integration of sensorimotor and contextual cues based on their reliability. Integration mechanisms at each level and the contribution of implicit to explicit SoA remain underspecified. In a task of movements with visual outcomes, we tested the effect of social context (contextual cue) and sensory prediction congruency (retrospective sensorimotor cue) over implicit (intentional binding) and explicit (verbal judgments) SoA. Our results suggest that prospective sensorimotor cues determine implicit SoA. At the explicit level, retrospective sensorimotor cues and contextual cues are partly integrated in an additive way, but contextual cues can also act as a heuristic if sensorimotor cues are highly unreliable. We also found no significant association between implicit and explicit SoA.

KEYWORDS

Sense of agency, cue integration, implicit level, feeling of agency, explicit level, judgment of agency, intentional binding, social interaction

3.1 Introduction

Sense of agency (SoA) refers to the subjective experience of being the cause of one's own actions and their consequences in the external world (Gallagher, 2000; Haggard, 2017; Moore, 2016). Recently, the importance of SoA in human cognitive functioning and its implications for the understanding of psychopathology have been underlined by the National Institute of Mental Health, as SoA was added as an important construct in their Research Domain Criteria framework (National Institute of Mental Health, 2019). Traditionally, there have been two competing approaches of SoA, respectively putting emphasis on different types of information and signals in the emergence of the experience of self-causation. The first highlights the role of internal signals from the sensorimotor system, as the other one downplays it to stress the importance of external, contextual cues from which agency can be inferred.

The Comparator model (Blakemore, Wolpert, & Frith, 2002; Frith, Blakemore, & Wolpert, 2000) is one of the most influential theories of SoA and was elaborated from a computational model of motor control (Wolpert, 1997; Wolpert & Ghahramani, 2000). In this account, the intention to perform a goal-directed action leads to the selection of a motor plan (an inverse model) that is the most likely to achieve that goal, conceptualized in terms of a desired sensory state. Then, two copies of the selected movement are derived from this inverse model: the first is a motor command that is sent to the effectors of the body in order to enact the action, and the second is a forward model that contains the predicted sensory consequences of the action. The predictions of the forward model are thereafter compared to the actual sensory feedback registered after the completion of the action. SoA emerges in the case of a concordance between predicted and actual sensory feedback and, in the case of a discordance, the action is perceived as caused by an external source. The Comparator model is notably supported by the observation that intensity of self-produced stimuli is reduced at both neural and subjective levels, a phenomenon

known as sensory attenuation (Blakemore, Wolpert, & Frith, 1998). This account thus emphasizes the importance of retrospective sensorimotor signals – more precisely here the output of the comparator that only becomes available after the execution of action— in the emergence of SoA.

Self-generated actions are also accompanied by a compression in the perceived temporal interval that separates an action from its outcome, a phenomenon named intentional binding (IB; Haggard, Clark, & Kalogeras, 2002) and commonly used as a proxy of SoA. IB is the fruit of a shift in the perceived time of occurrence of both action and outcome towards one another. This effect is seen as ensuing from the forward model concurrently generated with intentional action, and do not arise unless an intentional, voluntary movement is performed (Engbert, Wohlschläger, & Haggard, 2008; Engbert, Wohlschläger, Thomas, & Haggard, 2007; Moore & Obhi, 2012; but for a different account that sees causality as the source of this temporal binding, see Buehner, 2012). In an IB study, Moore and Haggard (2008) showed that, for actions with highly predictable outcomes, a shift in the perceived time of occurrence of an action was observable even when the expected auditory outcome of this action was not presented, thus suggesting that SoA can arise in spite of a mismatch at the comparator. These results indeed indicate that sensorimotor representations of action activated prior to the execution of the action itself, in this case the presence of action-outcome predictions, can suffice to produce a form of SoA. Such prospective motor cues to SoA also include fluency in the process of action selection and free choice over action selection, as they have been shown to significantly influence the strength of IB (Barlas & Kopp, 2018; Borhani, Beck, & Haggard, 2017; Chambon & Haggard, 2012; Wenke, Fleming, & Haggard, 2010). In sum, studies using IB paradigms have contributed to a sensorimotor approach by bringing to light some limitations of the Comparator model and by showing that prospective sensorimotor signals –that is, signals that are available before the execution of action— can contribute to the formation of a SoA.

Although completely different from the sensorimotor approach, Wegner's theory of apparent mental causation (Wegner, 2002; Wegner & Wheatley, 1999) is also a prominent account of SoA. In this view, actions are caused by contingencies not always detectable to consciousness, and the subjective experience of intentionality is built retrospectively from an inference that links a thought to a performed action. In order for a strong SoA to emerge, the thought experienced as causal must occur prior to the action, be semantically compatible with the performed action and appear to be its only plausible cause. Therefore, SoA can be externally manipulated by either changing the context in which actions are performed (e.g. presence of others or external forces as plausible cause of action) or by altering thought content. This theory gets support from multiple experiments using verbal reports of agency. These studies showed that it is possible to enhance SoA with subliminal primes for action (Aarts, Custers, & Wegner, 2005), to generate SoA for actions performed by others with simple instructions to move one's own body (Wegner, Sparrow, & Winerman, 2004) and to reduce agency over one's own actions by introducing ambiguity about their plausible causes, for instance with a mock neuroscience apparatus allegedly able to control thoughts (if thoughts are seen as internal actions; Olson, Landry, Appourchaux, & Raz, 2016).

These experiments challenge the sensorimotor approach of SoA, as they strongly suggest that the subjective experience of agency cannot be solely explained by the processing of information originating from the sensorimotor system. But Wegner's account also comprises major limitations and explanatory disadvantages, highlighted by Synofzik, Vosgerau, and Voss (2013). Indeed, if SoA was entirely determined by an inferential process using contextual information, it would be an extensively fallible process, sensitive to any event simultaneously occurring with an intention and to every misguided contextual belief. The sensorimotor system appears, in contrast, to constitute, for an agent, a more accessible and reliable source of information for distinguishing self-produced actions and outcomes.

3.1.1 Cue integration approach

In an attempt to overcome the limitations of both the Comparator model and the Theory of apparent mental causation and to acknowledge the contribution of different cues to the formation of SoA, two groups of researchers have coincidentally proposed new converging integrative accounts of SoA, that is the Cue integration theory (Moore & Fletcher, 2012; Moore, Wegner, & Haggard, 2009) and the Optimal cue integration framework (Synofzik, Vosgerau, & Lindner, 2009; Synofzik, Vosgerau, & Newen, 2008; Synofzik et al., 2013).

In their Cue integration theory, Moore and Fletcher (2012) propose that SoA follows the same Bayesian integration principles as those theorized by cue integration approaches of human perception. These approaches to human perception (Ernst, 2006; Ernst & Bülthoff, 2004) stipulate that an object's size and shape is estimated from multiple sensory signals (e.g. visual, haptic and auditory information). These signals are merged with a statistically optimal strategy that reduces the variance of the percept (Ernst & Banks, 2002) in a way that makes the perception of the object a coherent and robust experience. Furthermore, the different sensory signals are not weighed equally in the creation of the final percept, as human perception shows a bias towards visual information because of its reliability (Helbig & Ernst, 2007). The Cue integration theory of SoA echoes such principles and suggests that SoA is the product of the integration of various cues as a function of their reliability and availability in a particular context. Moore and Fletcher (2012) also suggest that human SoA shows an intrinsic bias towards the more robust internal sensorimotor cues, such as intention to move. This new Cue integration approach seems to enlighten the results of a number of interesting and more recent studies. Firstly, Moore et al. (2009) have shown that subliminal primes for action were able to create an IB effect for involuntary movements, a type of movement for which SoA does not usually arise, because they are not paired with prospective sensorimotor signals such as intention or outcome predictions. Secondly, in an intracranial stimulation study, by stimulating the left

inferior parietal region, Desmurget et al. (2009) were able to induce SoA over limb movements in participants that ultimately performed no movement. Moreover, they were able to provoke actual movements of limbs with stimulation of the premotor area, but no SoA for those provoked movements was reported by participants. Finally, in a study on the effect of prior causal beliefs on SoA, Desantis, Roussel, & Waszak, 2011 asked participants to perform an IB task in three different contexts: a first context in which they were told that they or a confederate could be the cause of a tone, a second context in which they were told that they were the only possible cause of action, and a third context in which they were told that a confederate was the only possible cause of outcome. In reality, participants were always the cause of the tone. The authors found a shift in the perceived time of outcome in both the “self-caused” and “uncertain” contexts but no shift of the perceived time of outcome for the “confederate-caused” context. Taken together, these findings suggest there exists a dominance of sensorimotor cues but that prior thought content or prior beliefs about the context in which action is performed can also significantly influence SoA. This also suggests that integration of sensorimotor and contextual cues might be interactive rather than strictly additive.

Synofzik et al. (2013) have put forward a similar account of SoA also suggesting that different SoA cues are integrated in an optimal fashion and are differentially weighed as a function of their reliability in different contexts. However, based on a critical appraisal of multiple key experiments in the field of SoA, they have extended this new Cue integration approach by introducing an important theoretical distinction between two levels in the experience of agency: an implicit feeling of agency and an explicit judgement of agency (Synofzik et al., 2008). The implicit level of agency is seen to consist in a pre-reflexive representation of action as being self-caused or not self-caused. This representation is thought to be largely based on an integration of sensorimotor signals (such as prospective cues like the forward model, action selection and retrospective cues like comparator output) and to operate outside our

awareness. This level of agency is usually associated with implicit measures of agency such as IB or sensory attenuation. By contrast, the explicit level of SoA is defined as a conscious causal attribution of an action to a specific agent. This explicit and metacognitive judgment of agency is thought to derive from the implicit level of agency, but also integrates other cues such as contextual cues and prior beliefs. The explicit SoA constitutes the level of agency that is measured by verbal reports.

3.1.2 Characterizing cue integration at both implicit and explicit levels: the present experiment

Therefore, the Cue integration approach sees SoA as a two-step process where multiple cues are integrated at both implicit and explicit levels. As this promising and flexible framework gathers a growing amount of interest, it calls for further empirical validation and theoretical specification. Numerous testable questions and hypotheses have been raised about the specific functioning of the integration mechanisms thought to be implied in the multiple levels of the experience of agency. Indeed, even though the integration of cues is thought to be interactive, the integration principles to which the different agency cues are subjected remain unknown. Theoretically, cue weighing could operate with principles of either (a) addition –meaning that SoA is reinforced proportionally to the individual effects of the cues’ reliability and availability; (b) heuristic –meaning that the presence of a cue is sufficient in itself to create SoA regardless of the reliability and availability of other agency cues; or (c) potentiation – meaning that the combination of cues has a greater effect on SoA than the individual effects of the cues’ reliability and availability. It is to note that integration principles (b) and (c) could be seen as interactive.

We can thus summarize our interrogations arising from this new conception put forward by Synofzik et al. (2013) and Moore and Fletcher (2012) into three testable questions that require further attention: (1) do sensorimotor (both prospective and retrospective) and contextual cues have different weights on implicit and explicit levels of agency, (2) are sensorimotor and contextual cues integrated according to the

principles of addition, heuristic or potentiation, and (3) in which proportion does the implicit level of agency determine the explicit experience of SoA?

With the experiment reported here, we sought to answer these questions and to quantitatively characterize cue integration at both implicit and explicit levels. In order to do so, we created a psychophysics task implying pinching movements that allowed us to simultaneously manipulate sensorimotor cues reliability and the context in which actions were performed. Retrospective sensorimotor cues were made less congruent with action by gradually altering the visual feedback offered to participants over their movements' outcomes. Context was manipulated by introducing another agent that could be a plausible cause of the actions performed, therefore inducing uncertainty in prior causal beliefs held by participants. We also simultaneously measured SoA at implicit and explicit levels for each action performed in the task, on a trial by trial basis, using respectively IB and verbal judgments of agency. As sensorimotor cues are reported to be largely dominant at implicit level of agency, we expected this level to be less sensitive to contextual cues than explicit level. We also expected sensorimotor cues and contextual cues to be integrated according to interactive principles. Finally, we expected verbal reports of agency to be associated with IB strength, as the implicit level of agency is thought to contribute to the explicit SoA.

3.2 Material and methods

3.2.1 Participants

Twenty-six participants were recruited at Université du Québec à Montréal and with an online add. Two participants were excluded because of misunderstanding of instructions. The analyses were therefore run on data from twenty-four participants (19 females; mean age = 32.17; SD = 10.25) All participants reported being right-

handed, having a normal or corrected to normal vision, having no history of cognitive or motor impairments, and taking no medication that could affect cognitive functioning. Written consent was obtained before the experiment and was renewed after the false belief debriefing. Participants received a 15 CAD compensation for their participation. The study was approved by the ethics committee of the Faculté des sciences humaines of Université du Québec à Montréal.

3.2.2 Apparatus

Participants were seated in a small room 3 feet from a 16 in. computer screen with a 1280 X 1024 resolution. They were sitting on an adjustable chair and their position and eye level were adjusted to be in line with the center of the screen. Participants were asked to lay down their right forearm in a custom-made arm brace, which was fixed on an adjustable table so the participants elbow could stay in a relaxed position with a 90° flexion. Participants used their thumb and index to perform pinch movements on a strain-gauge based isometric force sensor (Hand dynamometer, Vernier Software and Technology, Beaverton, Or) clipped on the adjustable table. Data acquisition of analog signals was made through a SensorDAQ interface box (Vernier Software and Technology). Participants' left hand was solicited to record, on the buttons of a computer mouse, subjective time intervals and agency answers (see procedure). Through the whole experiment, participants wore earmuffs (Stanley, QM24+ model, 25 dB reduction) in order to reduce sounds associated with the use of the dynamometer. Stimuli presentation and output recording were carried on with a custom algorithm programed with Psychtoolbox-3 running under MATLAB R2015b.

3.2.3 Task and procedure

Participants completed a psychophysics task requiring to realize a series of pinching movements with visual consequences on the computer screen, and this, in two different social contexts. Pinching movements were causing a green flash to appear on the computer screen and the height of this flash was determined by the force applied on the dynamometer. After each movement, measures of both implicit (IB with interval reproduction method) and explicit (dichotomous judgments of agency; hereafter JoA) SoA were obtained for these movements. Participants were informed that they would complete the same task once in a context where they would be the only agent able to cause the green flashes on the screen (hereafter *One agent* context) and once in a context where they would be playing “against” the experimenter, that would also be able to control, on some trials, the height of the green flashes on the screen (hereafter *two agent* context). The task included four different trial conditions, one with observation trials and three with operant trials (e.g. trials with pinching movements). First, in the observation condition, participants had to observe two flashes without moving. These trials were used as a baseline to contrast operant conditions. Evaluating interval perception between two external events allows to establish that potential binding in the operant conditions is caused by the presence of a movement and is neither an artefact of the experimental setup nor a time perception bias per se. In the second condition, called no alteration condition, participants had to realize a free pinching movement and a green flash corresponding to the force applied appeared on the screen. In the third (small alteration) and fourth (large alteration) conditions, participants also exerted a pinching movement on the dynamometer but the spatial congruency of the visual outcome was respectively lightly or importantly altered. Participants were uninformed of feedback alteration. Interval reproduction between event one (movement in operant conditions, first flash in observation condition) and event two (green flash), as well as JoA (me/not me), were obtained after each trial.

Prior to the beginning of the task, the device was calibrated to participants' maximal voluntary contraction (MVC). Participants pressed at their maximal force on the dynamometer's sensors for three trials. The highest force measured on these trials was used as participant's MVC (see Vaillancourt & Newell, 2003 for similar methodology; Wang et al., 2015). The MVC was used to create an individualized linear relationship between the force applied and the height at which the green flashes appeared on the screen. The device was calibrated so that participants applying a force corresponding to their MVC plus 10 % (this served as a buffer) would make the green flash appear at the very top of the computer screen. A minimum of a 10 N force was necessary for a movement to be registered and for a green flash to appear at the very bottom of the computer screen.

After calibration, participants were asked to complete a learning phase in order to familiarize themselves with the device and to learn the linear relationship between the force applied on the dynamometer and the height of green flashes. Participants were informed that the harder they pressed on the dynamometer, the higher on the screen the green flash would appear, with their maximal force corresponding to the superior limit of the screen. Participants were asked to press on the isometric force gauges with a quick and single movement of the thumb and index. The learning phase allowed procedural learning of internal models of action for the pinching movements and consisted of 90 trials for which participants were asked to hit targets with the green flash they controlled. On each trial, a black fixation cross was presented at the bottom of the screen. After a random delay between 750 and 1500 ms, the fixation cross changed into a rectangle, signaling it was time for the participant to press on the dynamometer, and a target appeared simultaneously. Targets appeared at three different heights on the screen corresponding to 20 %, 50 % and 80 % of the participant's MVC. There were 30 randomly interleaved trials for each target level. A

custom algorithm was programmed to detect six consecutive points of deceleration in the pinching movement (acquisition rate of approximately 84 Hz). It then retrieved retrospectively the maximum force in the movement curve (force peak) and the time of the trial at which this maximum force was applied. The random delay of 600 to 1200 ms was programmed to start at the time of the force peak and to end with the apparition of the green flash. (see Figure 3.1). At the end of this delay, a rectangle green flash appeared on the screen at the height that corresponded to the participant's pinching movement force for the trial. Throughout all the experiment, the green flashes had a random duration between 100 to 200 ms. Targets allowed participants to compare their projected force to their actual performance.

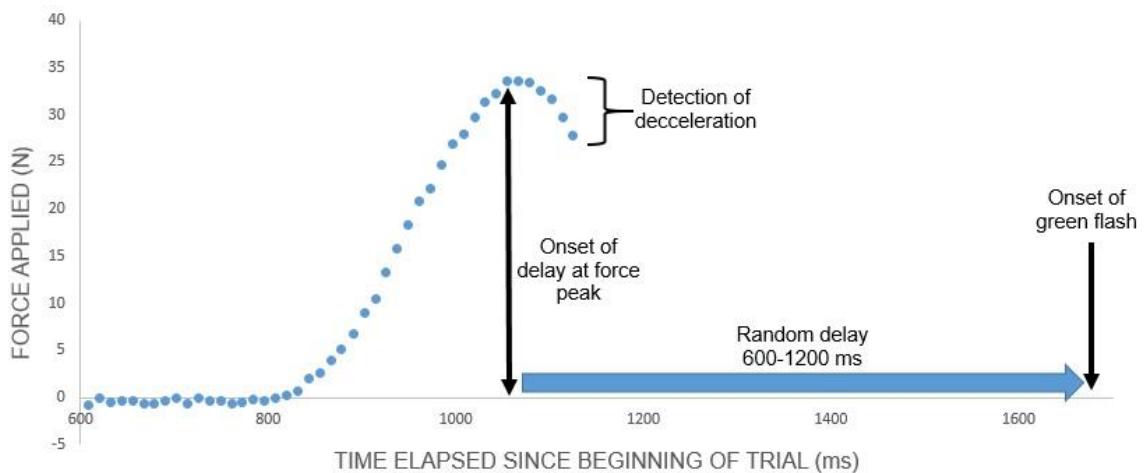


Figure 3.1: Representation of a typical trial and force curve

The learning phase was followed by the main task, which was completed once in the *one agent* context and once in the *two agent* context. The task was identical for the two social contexts except for the instructions given to the participants and the order of completion was counterbalanced across participants. Participants were instructed that the task consisted of a series of trials preceded by a fixation cross that could be whether black or white. For black trials, they were instructed to mentally pick any

height on the screen and execute a pinching movement with the necessary force to attain, with the green flash they controlled, this mentally fixed target. They were told that the relationship between the force applied on the dynamometer and the height at which the green flash would appear was equivalent to the relationship they experienced in the learning phase. For the *one agent* context, the participants were instructed that they would be the only person able to cause the green flashes on the screen. For the *two agent* context, they were instructed that, for an unknown amount of trials, the height of the green flash would not be determined by the force they employed in their pinching movement but would instead be determined by the experimenter from his computer. Participants were also informed that they would have to answer two questions about the flash perceived on the screen. For the *two agent* phase only, prior to start the task, the experimenter ostensibly connected a network cable from the experimental device to his own computer. The experimenter was seated at a desk that was positioned slightly behind the participants, on their right, in a way that his presence was apparent to the participants but his activities on the computer were not. For the white trials, participants were asked, for both *one agent* and *two agent* contexts, to simply pay attention to the screen and to answer the two questions about the flashes perceived on the screen.

In reality, for both social contexts, the height of the green flashes was determined and altered by a custom algorithm. However, in order to emphasize the pretended presence of a second agent as a plausible alternative cause of outcome in the *two agent* condition, the experimenter put in place a scenario where he ostensibly plugged a cable from the experimental device to a second computer under his control right before the beginning of the block. The experimenter than acted for the duration of the block as if he was controlling a program on his computer screen, which was not visible to participants. This allowed to induce a background belief that another intentional agent was a plausible alternative cause of the green flashes. For the *one agent* condition, participants were told they would be the only cause of flashes and

the experimenter's computer was not connected to the experimental device. After completion of the whole experiment, participants were informed of the deceptive procedure and their consent was renewed. The psychophysics task was actually structured as 105 randomly interleaved trials divided in four conditions: an observation condition (15 trials), preceded by the white fixation cross, and three operant conditions (60 trials with no alteration, 15 with small alteration and 15 with large alteration) indistinctly preceded by the black cross. Participants were uninformed of the presence of trials with altered feedback. The no alteration condition was overrepresented with 66 % of the operant trials because, for a sensory prediction to be contained in an internal model of action, this action's outcome must remain predictable.

In the operant conditions' trials, the transformation of the black fixation cross into a black rectangle informed the participants they were now free to pick a target height and make a pinching movement. Force peak in the movement was detected and a random delay between 600 to 1200 ms was triggered. Although IB is frequently investigated using shorter than 600 ms intervals, IB has been shown to occur in delays from 600 up to 4000 ms (Humphreys & Buehner, 2009, 2010; Ruess, Thomaschke, & Kiesel, 2017; 2018a). Random delays allow to avoid biases that could arise from participants' awareness of fixed delays or by delay-specific effects. Delays of this magnitude are also easier for participants to reproduce via a sustained mouse click. For the no alteration condition, a green flash appeared, after the random delay, at the vertical position corresponding to the force employed by the participants, and this, in accordance to the height/force relationship experienced in the learning phase. For the small and large alteration conditions, the vertical position of the green flash was altered so it appeared at a position corresponding to the force employed by the participant in accordance to the learned relationship $\pm 20\%$ and $\pm 40\%$, respectively, of participant's MVC. The valence of the alteration (higher vs lower than predicted position) was random, except for the situations in which the alteration

would have made the flash appear outside of the screen range. After the disappearance of the green flash, participants were first asked to reproduce, by holding one button of a computer mouse with their left index, the length of the time interval between their press on the dynamometer and the apparition of the flash. Participants were asked to realize, for the whole task quick, straightforward, pinching movements that would correspond to their chosen force and to avoid trying to correct the force applied throughout the movement. This allowed to outline, as the first event of the interval to reproduce, the moment where participants had applied maximal force in their pressing movements (force peak). Secondly, they were asked the question “Who caused the green flash?” and they had to answer by “Me” or “Not me” with either a left or right click on the computer mouse. Laterality of the “Me”/ “Not me” answers was counterbalanced across participants.

In the observation condition, the transformation of the white fixation cross into a white rectangle informed the participants they had to pay attention to the screen. After a fixed delay of 250 ms, a white flash with a random duration between 50 to 100 ms appeared at a random position in the vertical column of the screen. After disappearance of the white flash, a random delay between 600 and 1200 ms was triggered and a green flash appeared at the same position as the white flash. After the disappearance of the green flash, participants were first asked to reproduce, by holding one button of the computer mouse with their left index, the length of the time interval between the end of the white flash and the apparition of the green flash. Secondly, they were asked the question “Who caused the green flash?” and they had to answer by “Me” or “Not me” by either a left or right click on the computer mouse.

3.2.4 Measures and data analysis

3.2.4.1 Implicit level: intentional binding

We investigated IB using a temporal reproduction method developed by Humphreys and Buehner (2010). To allow comparing time reproductions between different intervals and conditions, we calculated a relative reproduction error (RRE) index for each trial by subtracting the objective inter-events interval from the subjective inter-events interval and by dividing this total by the objective inter-events interval. A positive RRE represents the degree to which the inter-events interval on a trial was overestimated by a participant and a negative RRE, the degree to which a participant underestimated the interval. A significantly lower RRE index for operant conditions (subjective action-outcome interval) compared to the observation condition (subjective external event-event interval) is an indication of the presence of an IB effect.

All analyses were run in IBM SPSS statistics (version 25). Data was preprocessed for outliers with the interquartile range (IQR) rule with a criterion of 3 IQR. Trials associated with an outlier RRE value were removed from all subsequent analyses. We ran a repeated measures factorial ANOVA using a linear mixed model approach with social context (*one agent, two agent*) and experimental conditions (observation, no alteration, small alteration, large alteration) as independent variables and RRE as a dependent variable. This approach offers many advantages over traditional analyses and is now regarded as a recommended method for repeated measures designs, as it allows to retain remaining data from participants with missing observations (i.e. outliers) and to model variance-covariance structure with more flexibility (Baayen, Davidson, & Bates, 2008; Bagiella, Sloan, & Heitjan, 2000). It also shows more robustness than traditional analyses to an unbalanced number of observations across conditions (Baayen et al., 2008). We modeled RRE data with a parsimonious linear mixed model with all factors being entered as fixed effects and the variance-covariance structure being set as compound symmetry.

3.2.4.2 Explicit level: Judgments of agency

We measured the explicit level of agency using a dichotomous verbal proxy. For each trial, participants were asked to make a JoA by answering the question “Who caused the green flash?” with either “Me” or “Not me”. This JoA was considered as the dependent variable in a repeated measures logistic regression using a generalized estimating equation (GEE) approach with social context (*one agent vs. two agent*) and experimental conditions (observation, no alteration, small alteration, large alteration) as independent variables. This approach allows to account for correlated repeated measures within subjects and is applicable to dichotomous variables (Zorn, 2001).

3.2.4.3 Relationship between implicit and explicit measures

To investigate the relationship between implicit and explicit measures of agency, we first computed a new continuous variable that could assess the presence and the intensity of an IB effect for each trial (the IB index). As IB is consisting of an underestimation of temporal interval between an action and its outcome in comparison to the estimation of the temporal interval between two external events, we calculated an individualized threshold value (RREmean_obs) in each participant, separately for each social context, consisting in the mean of RRE values for the observation condition. The RREmean_obs value was then used as a reference threshold that we subtracted from the RRE score of every trial of the operant conditions in order to create the IB index. A negative IB index then represents a trial in which an IB effect was detected. A null or positive IB index is seen as an indication that there was no IB effect for the movement executed in that trial. To test if there was a connection between IB and JoA in the operant conditions, we ran a repeated measures logistic regression using a GEE approach with the IB index, social context and operant conditions as independent variables and JoA as the dependent variable.

3.3 Results

3.3.1 Effect of social context and feedback alteration on implicit measure

The mixed model analysis for RRE showed significant main effects of social context ($F(1,5012) = 6.11; p < 0.05; F^2 = 0.003$) and experimental conditions ($F(3,5012) = 144.95; p < 0.001; F^2 = 0.088$), but no interaction ($p = 0.067; F^2 = 0.001$). Post-hoc pairwise comparisons of RRE means across experimental conditions were run and adjusted for multiple comparisons using the Bonferroni correction. RRE levels are shown in Figure 3.2 and were found to be significantly lower in all of the operant conditions compared to the observation condition ($p < 0.001$). RRE levels did not vary between operant conditions in either of the social contexts ($p > 0.05$). These results indicate the presence of an IB effect for pinching movements in every operant condition as participants showed a greater underestimation of time intervals for these conditions compared to the observation condition.

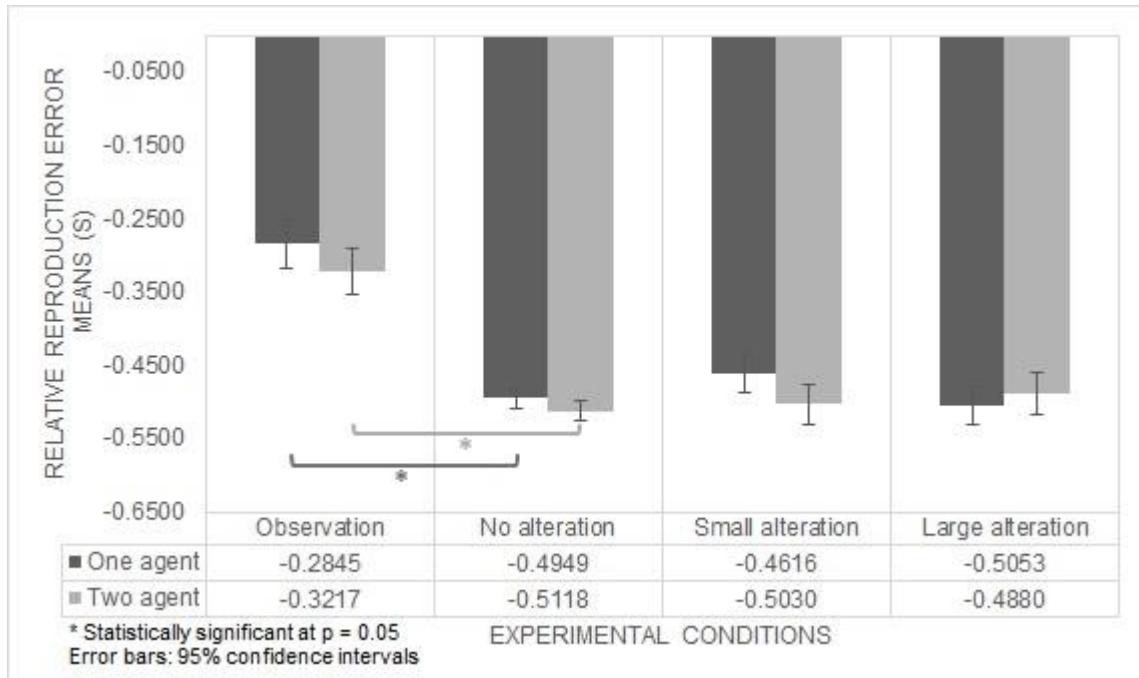


Figure 3.2: Implicit measure – Relative reproduction error means

3.3.2 Effect of social context and feedback alteration on explicit measures

The GEE model for JoA showed significant main effects of social context ($\text{Wald } \chi^2_1 = 57.16; p < 0.001$) and experimental conditions ($\text{Wald } \chi^2_3 = 187.09; p < 0.001$), and also a significant interaction effect ($\text{Wald } \chi^2_3 = 15.99; p < 0.01$). These results are illustrated in Figure 3.3. To further investigate the two main effects and the interaction effect, we ran three sets of post-hoc pairwise comparisons in order to compare, respectively, JoA levels across social contexts for each experimental condition, JoA levels across conditions for each social context, and slopes of JoA levels between pairs of experimental conditions across social contexts. Alpha values of $p < 0.05$ were used and Bonferroni corrections were applied. The results of those pairwise comparisons are reported in Table 3.1. The levels of self-attribution were significantly different across all conditions, and this, for both contexts. We also found that levels of self-attribution significantly differed across the two contexts within each

of the four conditions (observation, no alteration, small alteration, large alteration). When analyzing the slopes of JoA levels between pairs of experimental conditions across social contexts (e.g. Δ condition observation – condition no alteration in the *one agent* context versus Δ condition observation – condition no alteration in the *two agent* context), we found a significant difference only between the small alteration and large alteration conditions. Odds ratio (OR) were calculated for every comparison to assess effect size of every level of the independent variables. For example, the OR of 20.43 in Table 3.1 means that the chances for a participant to answer “me” in the no alteration condition is 20.43 times higher in the *one agent* context than in the *two agent* context.

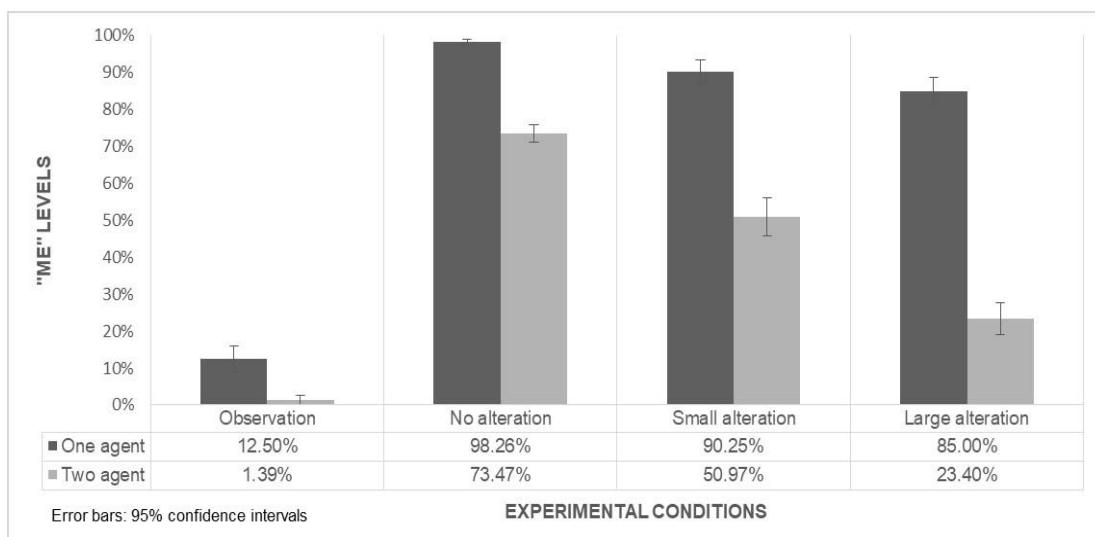


Figure 3.3: Self-attribution levels for judgments of agency

Table 3.1: Main effects and pairwise comparisons of GEE model for judgments of agency –Self-attribution levels

| Main effects | | | | | |
|--|--|---------------|-----------|-------------|-------------|
| Effect | Wald Chi-square | df | p | | |
| Contexts | 57.1583 | 1 | < 0.001** | | |
| Conditions | 187.0858 | 3 | < 0.001** | | |
| Contexts X Condition | 15.9904 | 3 | 0.001** | | |
| Pairwise comparisons of conditions for each context | | | | | |
| Phase | Comparison | Wald χ^2 | df | Corrected p | Odds ratio |
| One agent | Observation vs No alt. | 89.701 | 1 | < 0.001** | 0.003 |
| One agent | No alt. vs Small alt. | 19.466 | 1 | < 0.001** | 6.10 |
| One agent | Small alt. vs Large alt. | 8.0074 | 1 | 0.028** | 1.64 |
| One agent | Observation vs Small alt. | 56.454 | 1 | < 0.001** | 0.015 |
| One agent | Observation vs Large alt. | 53.101 | 1 | < 0.001** | 0.025 |
| One agent | No alt. vs Large alt. | 22.342 | 1 | < 0.001** | 9.98 |
| Two agent | Observation vs No alt. | 145.1 | 1 | < 0.001** | 0.005 |
| Two agent | No alt. vs Small alt. | 31.143 | 1 | < 0.001** | 2.66 |
| Two agent | Small alt. vs Large alt. | 28.761 | 1 | < 0.001** | 3.39 |
| Two agent | Observation vs Small alt. | 102.48 | 1 | < 0.001** | 0.014 |
| Two agent | Observation vs Large alt. | 65.728 | 1 | < 0.001** | 0.046 |
| Two agent | No alt. vs Large alt. | 57.561 | 1 | < 0.001** | 9.05 |
| Pairwise comparisons of contexts within each condition | | | | | |
| Condition | Comparison | Wald χ^2 | df | Corrected p | Odds ratio |
| Observation | One agent vs two agent | 31.349 | 1 | < 0.001** | 10.14 |
| No alt. | One agent vs two agent | 31.145 | 1 | < 0.001** | 20.43 |
| Small alt. | One agent vs two agent | 18.385 | 1 | < 0.001** | 8.91 |
| High alt. | One agent vs two agent | 45.375 | 1 | < 0.001** | 18.51 |
| Comparisons of differences between pairs of conditions across contexts | | | | | |
| Difference | Comparison | Wald χ^2 | df | Corrected p | Odds ratio |
| Δ Observation-No alt. (Δ ON) | Δ ONone _{agent} vs Δ ONTwo _{agent} | 0.9814 | 1 | 1 | 0.003/0.005 |
| Δ no alt.-small alt. (Δ NS) | Δ NSone _{agent} vs Δ NStwo _{agent} | 3.6341 | 1 | 0.34 | 6.10/2.66 |
| Δ small alt.-large alt. (Δ SL) | Δ SLone _{agent} vs Δ SLtwo _{agent} | 8.3015 | 1 | 0.024** | 1.64/3.39 |
| Δ Observation-Small alt. (Δ OS) | Δ OSone _{agent} vs Δ OStwo _{agent} | 0.0391 | 1 | 1 | 0.015/0.014 |
| Δ Observation-large alt. (Δ OL) | Δ OLone _{agent} vs Δ OLtwo _{agent} | 1.1524 | 1 | 1 | 0.025/0.046 |
| Δ no alt.-large alt. (Δ NL) | Δ NLone _{agent} vs Δ NLtwo _{agent} | 0.0401 | 1 | 1 | 9.98/9.05 |

** $p < 0.05$, statistically significant; alt.=>alteration

3.3.3 Relationship between implicit and explicit measures

The GEE model for the IB-JoA relationship found no significant main effect of IB index over JoA ($\text{Wald } \chi^2_1 = 3.55; p = 0.059$; OR = 2.89). The model showed significant effect of social context ($\text{Wald } \chi^2_1 = 25.82; p < 0.001$) and operant conditions ($\text{Wald } \chi^2_2 = 53.98; p < 0.001$). There was no significant social context X IB index interaction ($\text{Wald } \chi^2_1 = 0.11; p = 0.743$), experimental X IB index interaction ($\text{Wald } \chi^2_2 = 0.85; p = 0.655$), experimental conditions X social context interaction ($\text{Wald } \chi^2_2 = 3.63; p = 0.163$), nor triple interaction effect ($\text{Wald } \chi^2_2 = 1.16; p = 0.559$). As the effects of social context and experimental conditions on JoA had already been analyzed in a precedent GEE model, no post-hoc pairwise comparisons were conducted.

3.4 Discussion

The aim of the study was to (1) determine if there was a difference in the weighing of sensorimotor and contextual cues at the implicit and explicit levels of SoA, (2) to clarify what the integration principles at work at both levels were, and (3) to evaluate the contribution of the implicit level of agency to the explicit one.

3.4.1 Integration at implicit level: prospective sensorimotor cues dominate implicit level of SoA

We detected an IB effect for pinching movements and their outcome in all operant conditions in both social contexts, as subjective interval means were significantly lower in these conditions as compared to the observation condition. Alteration of feedback allowed us to manipulate the degree of congruency between predicted and actual height of the visual outcome, gradually reducing the match at the comparator and thereby reducing the reliability of this retrospective sensorimotor cue indicating

self-agency. However, IB strength was equivalent in the no alteration, the small alteration and the large alteration conditions for both social contexts, indicating that a discrepancy between predicted height and occurring height of the green flash didn't reduce SoA at the implicit level.

These results contrast with those of a few studies showing that IB is stronger for actions followed by congruent outcome in comparison to actions where prediction and outcome are incongruent (Barlas & Kopp, 2018; Ebert & Wegner, 2010). However, other studies have rather found that IB was unaltered by a mismatch between the predicted and the actual identity or intensity of the outcome (Beck, Di Costa, & Haggard, 2017; Desantis et al., 2011; Haering & Kiesel, 2014). We believe that differences in the level of action's outcome predictability can account for the different findings across studies. Indeed, in the first two studies (with stronger IB for congruent outcomes), actions were associated with a congruent outcome on only 50 % of trials and congruency was, in fact, not understood in terms of predictability of the outcome in the task itself, but in terms of a previous natural perceptual association. For example, in the Barlas and Kopp (2018) experiment, pressing on a right arrow triggered the image of a right arrow on the screen on half the trials (so-called congruent condition) and an arrow pointing in some other directions the second half of trials (so-called incongruent condition). However, based on action-outcome contingencies during this task, one might not have been able to reliably associate the apparition of a right arrow to the action of pressing on the right arrow. In the latter group of studies, specific actions were associated with an outcome that was presented on 70 to 90 % of the trials, enabling one to construct predictions about the outcome's identity based on action-outcome contingencies. Looking back at our experiment, we suggest that, as the no alteration condition constituted 67 % of the operant trials, the outcome was predictable based on action-outcome contingencies. Taking into considerations researches that have shown that involuntary, but causal, movements do not trigger a temporal binding effect over their outcomes (Engbert et al., 2008;

Engbert et al., 2007; but for a diverging opinion on the role of causality in binding, see Buehner, 2012), we interpret the binding effect found in our experiment as arising from predictions signals associated with intentional action, such as the forward model and action selection, resulting from free choice over the force employed. Those prospective sensorimotor cues were available in all operant conditions. This is in line with Synofzik et al. (2013) who argued that those sensorimotor priors can suffice to establish an implicit SoA. Our results also support Moore and Fletcher (2012) assumption that prospective sensorimotor cues such as internal predictions signals, have, when they are available, a predominant influence over IB in comparison to retrospective cues.

We found no difference of IB strength across the social contexts. We found no interaction between social contexts and experimental conditions, which means that the difference in interval reproductions between the observation condition and the operant conditions was the same for both *one agent* and *two agent* contexts. Therefore, inducing uncertainty over the plausible cause of the action's outcomes didn't affect SoA at implicit level as measured by IB. This result reproduces the findings of Desantis, Hughes, and Waszak (2012) who measured IB under three different background beliefs about the social context of actions. Like them, we found that IB strength was the same for actions performed under the belief of pure self-causation or under uncertainty about the agentic cause of action's outcome. In their experiment, Desantis et al. (2012) had a third condition in which they induced a background belief that another agent was the only plausible cause of an action. They found that this particular background belief, which wasn't induced in any of our experimental conditions, was associated with a decrease in IB strength, suggesting that contextual beliefs of pure external causation can reduce SoA at the implicit level.

Note that the contrast of conditions used in our experiment to calculate IB strength faces certain limitations. Apart from the presence of an intentional, voluntary movement, the observation condition differed from the operant conditions in two aspects. First, the observation condition did not include a causal relationship between the first and the second event, contrary to the operant conditions, in which the voluntary movement was the explicit cause of the green flash. It was recently argued (Buehner, 2012, 2015) that temporal binding between an action and its outcome could be explained by mere inferences of causality. One of Buehner's main argument was that the conditions used in the original IB paper (Haggard, Clark, & Kalogeras, 2002) confounded intentionality and causality. We agree with Buehner that the design of the original experiment did not allow isolating intentionality from causality, but we consider, along with others (Moore & Obhi, 2012), that numerous experiments, using different experimental setups have since successfully contrasted voluntary vs. involuntary causal movements and demonstrated the necessity of intentionality in order for the binding effect to arise (Cravo, Claessens, & Baldo, 2009; Engbert, Wohlschläger, & Haggard, 2008; Engbert, Wohlschläger, Thomas, & Haggard, 2007; Wenke & Haggard, 2009). Even in Buehner's studies (2012, 2015), binding effects were observed mainly in the voluntary conditions, and were more pronounced than in the involuntary (unintentional) conditions. In light of these results, the "intentional account" of the temporal binding effect appears better supported by empirical data. However, our contrast of conditions did not allow controlling the potential contribution of non-intentional causality to the binding effect observed.

Second, the first event in the operant condition and the one in the observation condition differed in terms of sensory modality. Indeed, in the operant conditions, the movement that constituted the first event entailed tactile and proprioceptive feedback, while the first flash in the observation condition solicited the visual system only. Differences in the sensory modalities solicited across conditions could have contributed to the differences in time reproductions between conditions, as visual

stimuli might be perceived as lasting longer than tactile stimuli that are equivalent in objective duration (Tomassini, Gori, Burr, Sandini, & Morrone, 2011). Nevertheless, even though a portion of the total binding could have resulted from differences in sensory modalities across conditions, our design still allowed us to discriminate the differential contributions of sensorimotor and contextual cues to IB.

To recapitulate, our experiment suggests that, in a context where action-contingencies remained predictable, prospective sensorimotor signals become available and can suffice to create an implicit SoA over action's outcome, as measured by IB, even when retrospective sensorimotor cues' reliability is reduced by the introduction of a mismatch between the predicted and occurring position of the outcome. Our experiment also supports the view that contextual beliefs of uncertainty over the plausible agentic cause of the outcome does not diminish IB strength. Therefore, prospective sensorimotor cues seem to function as a heuristic that suffice to create an implicit SoA regardless of the availability and reliability of retrospective sensorimotor and contextual cues.

3.4.2 Integration at explicit level: Weighing of contextual and sensorimotor cues is interactive

Contrary to the implicit level, we found that both social context and feedback alteration had an impact on the explicit level of SoA experienced by participants, as measured by dichotomous JoA. Our results showed that main effect of feedback conditions and social context were significant, as well as the interaction between these two factors.

Firstly, post-hoc pairwise comparisons revealed that self-attribution levels were significantly reduced with each condition of feedback alteration across operant conditions and this, for both social contexts, confirming that a mismatch between predicted and actual outcome can reduce explicit SoA in a variety of situations.

Indeed, some studies have investigated the effect of visuospatial alteration of a movement's outcome over explicit SoA. The introduction of an angular bias over the virtual representation of a hand movement (Farrer, Bouchereau, Jeannerod, & Franck, 2008; Saito, Takahata, Murai, & Takahashi, 2015) and the addition of turbulence to a mouse cursor controlled by participants in a computer game (Sidarus, Vuorre, Metcalfe, & Haggard, 2017) were found to reduce SoA over movement. Our results extend the findings of these studies by showing that altering the position of the visual outcome of a ballistic movement (pinching) also reduces explicit SoA. Our results suggest, as well, that the degree to which the actual outcome is displaced in comparison to the expected position has a graded effect on the levels of self-agency experienced by participants. This means that, contrary to the implicit level, prospective sensorimotor cues (free choice, predictions signals) do not exert an exclusive influence over explicit SoA, as measured by dichotomous JoA. Rather, our experiment confirms that the retrospective sensorimotor cue that arise from the comparator critically contributes to the conscious experience of self-agency and that diminishing the match between sensory predictions and actual outcome gradually restrain the probability that explicit SoA emerges.

Secondly, we identified a main effect of social context over JoA. Post-hocs revealed that self-attribution levels were significantly lower in the *two agent* context compared to the *one agent* context, and this, in every experimental condition (observation, no alteration, small, large). This strongly suggests that the conscious experience of agency (the explicit level) is not solely determined by bottom-up sensorimotor cues as it is proposed by the Comparator model (Frith et al., 2000), but that contextual top-down cues also play an important role in the experience of agency, in line with Wegner's theory of apparent mental causation (Wegner, 2002; Wegner & Wheatley, 1999). Our results are also in line with the findings of the Olson et al. (2016) experiment, in which participants reported a diminished level of explicit SoA over their own thoughts when participants where told a neuroscience apparatus was able to

influence their thinking. However, in Wegner's theory of apparent mental causation, for an internal intention to be considered as the cause of one's action, this intention has to be the only plausible cause of action and outcome. In this view, causal exclusivity of one's intention to move over an outcome is thus a necessary condition for the emergence of SoA. Our results do show that a background belief of being the only plausible cause of an action's outcome importantly increases the chance to report self-causation at the explicit level of SoA. Nonetheless, participants still experienced self-agency over action's visual outcome, for example, in 73 % of the trials of the no alteration condition in the *two agent* context. This implies that explicit SoA can emerge even in a context where the outcome could have been caused by either their own intention or by another agent. Therefore, perceived causal exclusivity does not seem to be a necessary condition for SoA to emerge, but could rather be seen as a significant contextual cue that is combined to prediction-outcome congruency in the formation of explicit SoA. Globally, this shows that contextual and sensorimotor cues are differentially weighed at the implicit and explicit levels of SoA, as social context had no effect at the implicit level on IB strength.

Finally, and most importantly, our results confirm that sensorimotor and contextual cues are not integrated at the explicit level in a strictly additive way. This is indicated by the significant interaction effect detected between social contexts and experimental conditions in the formation of JoA. It implies that reducing reliability of retrospective sensorimotor cues by adding a graded amount of discrepancy at the comparator didn't have an identical effect on self-attribution levels in the two social contexts. Post-hoc comparisons of the slopes of JoA levels between pairs of experimental conditions across social contexts show that this global interaction effect is driven by the difference between small versus large alteration conditions across *one agent* and *two agent* contexts. In other words, this means that adding a small discrepancy between predicted and actual outcome was associated with a similar reduction of "me" levels in comparison to the no alteration condition in both social

contexts, but that adding a large discrepancy was associated with a significantly larger reduction in the *two agent* context than in the *one agent* context. Indeed, odds ratio show that the chances of answering “me” in the small alteration condition were only 1.64 times higher than in the large alteration conditions in the *one agent* context, compared to 3.39 times higher in the *two agent* context. In light of these results, we suggest that causal belief that one is the only plausible cause of action can act as a top-down heuristic that may suffice to create SoA over an outcome in the situation where retrospective sensorimotor cues are strongly unreliable.

3.4.3 Absence of association between implicit and explicit SoA: independent or serial systems?

According to Synofzik et al. (2013) framework, JoA over actions made at the explicit level of agency are largely based on the registration of agency at the implicit level. Contrary to this assumption, we found no association between IB strength and dichotomous JoA. In fact, aside from Synofzik et al. (2009) theoretical suggestion, and beside the growing evidence that various agency cues can simultaneously influence both implicit and explicit measures of agency (Barlas & Kopp, 2018; Ebert & Wegner, 2010; Gentsch, Kathmann, & Schütz-Bosbach, 2012), the direct contribution of the implicit level to explicit agency has been underinvestigated (Moore & Fletcher, 2012).

To our knowledge, only a limited amount of studies have focused on the direct association between IB and explicit reports of SoA, with mitigated results, some of them reporting a complete dissociation (Braun, Thorne, Hildebrandt, & Debener, 2014; Dewey & Knoblich, 2014; Majchrowicz & Wierzchoń, 2018; Saito et al., 2015) and others reporting a correlation between these two aspects of agency (Imaizumi & Tanno, 2019; Moore, Middleton, Haggard, & Fletcher, 2012; Pyasik, Burin, & Pia, 2018). However, a significant amount of those studies did not seem a convincing test

of the direct influence of implicit (IB) over explicit (JoA) levels of agency for action, due to methodological limitations. Indeed, only the two recent studies by Imaizumi and Tanno (2019) and Pyasik et al. (2018) were designed to obtain IB and JoA measures for a specific action on a trial by trial basis. In Dewey and Knoblich (2014), Majchrowicz and Wierzchoń (2018) and Braun et al. (2014) experiments, participants were asked to make JoA over a whole block of trials while IB was assessed on a trial to trial basis. Moore et al. (2012) measured JoA by asking participants to evaluate the probability to cause an outcome on the next trial. In Saito et al. (2015) paper, IB and JoA were rather obtained in two completely separate tasks. We argue that measuring IB and JoA over different actions represents a suboptimal way of evaluating the relationship between implicit and explicit levels of agency. SoA is better understood as the subjective experience of self-causation for a given action and, therefore, the implicit and explicit components of this experience should not be assessed over multiple actions at the same time. Indeed, implicit and explicit levels are sensitive to various internal and external cues that may fluctuate across experimental contexts and even across trials of the same experimental conditions. Our experimental design allowed measuring both IB strength and JoA on a trial by trial basis and thus assessing the direct association between the two levels of agency for a specific action. But contrary to Imaizumi et Tanno (2019) and Pyasik et al. (2018), we found no significant association between the implicit level of agency and the explicit level.

The contribution of implicit level of SoA to the explicit JoA patently requires further investigation, as one cannot rule out that the absence of significant correlation between IB and JoA in our results could be related to the relatively small sample size. A Bayesian statistical approach could be useful in future research to statistically validate this potential absence of correlation between implicit and explicit proxies of SoA. However, the absence of association reported here between IB strength and dichotomous JoA could be a preliminary indication that the registration of agency at implicit level is not, in itself, a cue that is integrated at the explicit level.

One possible explanation that could account for a theoretical dissociation between implicit and explicit proxies of SoA, such as IB and dichotomous JoA, is that implicit and explicit SoA are two independent cognitive systems that operate in parallel and serve different adaptive functions. The implicit level could allow rapid cognitive and behavioral responses to self-generated stimuli such as action-monitoring, motor learning, motor correction, central cancelation and experience of motor flow. The explicit level could constitute a more flexible and reliable subjective experience of agency, that integrates a greater variety of cues, such as complex social information, but that would be too slow to arise for basic motor processes such as action-monitoring and motor correction. These two systems could use similar information, but integrate it differently, as they would serve different functions. In this independent levels view of agency, the registration of agency at the implicit level would not enter in itself the integration process at explicit level, unlike it is suggested in the Optimal cue integration framework put forward by Synofzik et al. (2013).

To the contrary, studies finding an association between IB and JoA on a trial by trial basis (Imaizumi & Tanno, 2019; Pyasik et al., 2018) could be seen as supportive of Synofzik and al.'s framework, that rather conceptualizes the functioning of the two levels of agency as serial and dependent. A possible explanation that could account for diverging results between those studies and ours is that the relationship between levels of agency is not the same across sensory modalities and across action-outcome delays. This could also be congruent with knowledge that IB is stronger in the auditory than in the visual modality (Ruess, Thomaschke, & Kiesel, 2018b). Indeed, Imaizumi and Tanno (2019) and Pyasik & al. (2018) report that IB and JoA are positively correlated for action that had outcomes in the auditory modality. But in a second experiment with visual instead of auditory outcomes, Imaizumi et Tanno did not identify any correlation between the two levels of SoA when using an inter-

individual analysis (linear regressions with the effect of outcome delay). They report, however, a positive correlation (Spearman's rho = 0.479) between IB and JoA using an intra-individual statistical analysis (Spearman's rank correlation), which is not converging with our results. In their experiment, they also did not identify any IB effect for action-outcome with delays longer than 500 ms. This is also incongruent with our results, that show a significant IB effect in the visual modality for action-outcome delays from 600-1200 ms. Imaizumi et Tanno's approach seems interesting to investigate intra-individual covariations of IB and JoA, but we suggest that those results need further replication, particularly in the visual modality.

We also have to underline here that alternative measures to IB have also been used as proxies of implicit SoA. In that respect, in order to contextualize our findings, it is enlightening to examine studies assessing the connection between the two levels of agency using an alternative proxy such as sensory attenuation. Sensory attenuation is a reduction in the perceived intensity of self-generated stimuli in comparison to stimuli that are externally generated (Blakemore, Wolpert, & Frith, 1998), and it can be measured both at the behavioral and at the cortical level, using event-related potentials in electrophysiology. Several studies have found no association between explicit SoA and sensory attenuation, as measured by early response in the primary sensory cortices (N1 waves; Gentsch, Kathmann, & Schütz-Bosbach, 2012; Kühn et al., 2011; Timm, Schönwiesner, Schröger, & SanMiguel, 2016; Weller, Schwarz, Kunde, & Pfister, 2017). However, an association between JoA and latter components of the cortical sensory response to self-generated stimuli, such as P2 and P3a, have been established (Kühn et al., 2011; Timm et al., 2016). There again, it raises the question of whether later cortical components of the sensory response that are correlated to explicit agency are themselves based upon the implicit registration of agency or are parallel sensory signals that are used in an independent explicit level's integration process.

Thus, as of now, we argue that it is still to determine whether implicit and explicit levels of agency work as independent or serial/dependent systems because of contrasting results suggesting either an absence of association (our study) or an association (Imaizumi & Tanno, 2019; Pyasik et al., 2018) in the few studies that have investigated the link between IB and JoA on a trial by trial basis.

3.5 Conclusion: implications for cue integration approach of SoA

The recent development of the promising cue integration approach (Moore & Fletcher, 2012; Synofzik et al., 2013) have allowed to explore SoA with a more flexible framework and to overcome conceptual limitations of previous models, notably with the introduction of the two levels of agency. However, the exact integration mechanisms at work at each of these levels of agency remains underspecified. Our experiment allowed us to explore the relative weighing of sensorimotor and contextual cues at implicit and explicit levels, as well as to evaluate the contribution of the implicit registration of agency to the explicit level of SoA. In our experiment, we measured implicit SoA with IB and explicit SoA with dichotomous JoA for every action performed, that is, on a trial by trial basis. We manipulated retrospective sensorimotor cues' reliability by gradually altering the action-outcome spatial congruency, as well as contextual cues by inducing different beliefs about the number of agents that could be a plausible cause of action's outcome.

Our results indicate that sensorimotor and contextual cues are differentially weighed at implicit and explicit levels of SoA. Prospective sensorimotor signals, such as action selection signals and forward model of action, seem sufficient to produce a feeling of agency and, therefore, act as a heuristic cue that can inform implicit agency, as we found that diminishing retrospective sensorimotor cues' reliability and modifying the social context in which actions were performed didn't alter IB strength.

Our results also show that cues are weighed based on different integration principles at the explicit level. Indeed, we found that retrospective sensorimotor and contextual cues were partly weighed in an additive way at the explicit level of SoA, as adding discrepancy between predicted versus actual outcome and adding uncertainty to the social context were both associated with a systematic reduction of self-attribution levels. However, we also found that those cues could interact, as the contextual belief of being the only plausible cause of an action seemed to be a heuristic sufficient to engender SoA at the explicit level in the condition where retrospective sensorimotor cues were highly unreliable (large alteration condition).

We also found no correlation between IB strength and dichotomous JoA on a trial by trial basis. This could be a preliminary indication that there exist a dissociation between implicit and explicit SoA, but further investigations would be needed in order to validate those results. Our results also contrast with those of two recent studies (Imaizumi & Tanno, 2019; Pyasik et al., 2018) finding an association between IB and JoA in the auditory modality. We suggest that the two levels of agency could either be independent systems serving different adaptive functions or serial and dependent systems with explicit agency building over the implicit registration of agency, as it was first proposed by Synofzik et al. (2013). Even though our results are more in line with the independent systems hypothesis, this question needs further investigation as only few studies directly addressed it with implicit and explicit measures taken on a trial by trial basis. We also suggest that coming studies in the field of SoA explore sensory modalities specificities in connection with both the relationship between implicit and explicit levels and with cue integration mechanisms at each level. The use of multiple implicit proxies, both at the behavioral and cerebral levels, in the same experimental design could also bring a deeper insight in the implicit-explicit SoA relationship.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank Hugues Leduc for statistical counseling and Anthony Hosein for his contribution to experimental task programming.

FUNDING

This work was supported by career awards from Fonds de recherche du Québec – Santé (FRQS) to IS and BFA. AL received a doctoral award from FRQS. FRQS was not involved in the conduct of study or manuscript preparation.

DECLARATION OF INTEREST

None.

REFERENCES

- Aarts, H., Custers, R., & Wegner, D. M. (2005). On the inference of personal authorship: Enhancing experienced agency by priming effect information. *Consciousness and cognition*, 14(3), 439-458.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.concog.2004.11.001>
- Baayen, R. H., Davidson, D. J., & Bates, D. M. (2008). Mixed-effects modeling with crossed random effects for subjects and items. *Journal of Memory and Language*, 59(4), 390-412. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jml.2007.12.005>
- Bagiella, E., Sloan, R. P., & Heitjan, D. F. (2000). Mixed-effects models in psychophysiology. *Psychophysiology*, 37(1), 13-20.

Barlas, Z., & Kopp, S. (2018). Action choice and outcome congruency independently affect intentional binding and feeling of control judgments. *Front Hum Neurosci*, 12, 137.

Beck, B., Di Costa, S., & Haggard, P. (2017). Having control over the external world increases the implicit sense of agency. *Cognition*, 162, 54-60.

Buehner, M. J. (2012). Understanding the Past, Predicting the Future: Causation, Not Intentional Action, Is the Root of Temporal Binding. *Psychological science*, 23(12), 1490-1497. doi:10.1177/0956797612444612

Buehner, M. J. (2015). Awareness of voluntary and involuntary causal actions and their outcomes. *Psychology of Consciousness: Theory, Research, and Practice*, 2(3), 237.

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

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

Borhani, K., Beck, B., & Haggard, P. (2017). Choosing, Doing, and Controlling: Implicit Sense of Agency Over Somatosensory Events. *Psychological science*, 28(7), 882-893. doi:10.1177/0956797617697693

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(11), e111967. doi:10.1371/journal.pone.0111967

Chambon, V., & Haggard, P. (2012). Sense of control depends on fluency of action selection, not motor performance. *Cognition*, 125(3), 441-451.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2012.07.011>

Cravo, A. M., Claessens, P. M., & Baldo, M. V. (2009). Voluntary action and causality in temporal binding. *Experimental Brain Research*, 199(1), 95-99.

Desantis, A., Hughes, G., & Waszak, F. (2012). Intentional binding is driven by the mere presence of an action and not by motor prediction. *PloS one*, 7(1), e29557.

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

doi:<https://doi.org/10.1016/j.concog.2011.02.012>

Desmurget, M., Reilly, K. T., Richard, N., Szathmari, A., Mottolese, C., & Sirigu, A. (2009). Movement Intention After Parietal Cortex Stimulation in Humans. *Science*, 324(5928), 811-813. doi:10.1126/science.1169896

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

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

Engbert, K., Wohlschläger, A., & Haggard, P. (2008). Who is causing what? The sense of agency is relational and efferent-triggered. *Cognition*, 107(2), 693-704.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2007.07.021>

Engbert, K., Wohlschläger, A., Thomas, R., & Haggard, P. (2007). Agency, subjective time, and other minds. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 33*(6), 1261-1268. doi:10.1037/0096-1523.33.6.1261

Ernst, M. O. (2006). A Bayesian View on Multimodal Cue Integration. In G. Knoblich, I. Thornton, M. Shiffrar, & M. Grosjean (Eds.), *Human Body Perception from the Inside Out*: OUP USA.

Ernst, M. O., & Banks, M. S. (2002). Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature, 415*, 429. doi:10.1038/415429a

Ernst, M. O., & Bülthoff, H. H. (2004). Merging the senses into a robust percept. *Trends in cognitive sciences, 8*(4), 162-169. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.02.002>

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

Frith, C. D., Blakemore, S.-J., & Wolpert, D. M. (2000). Abnormalities in the awareness and control of action. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B, 355*(1404), 1771-1788.

Gallagher, S. (2000). Philosophical conceptions of the self: implications for cognitive science. *Trends in cognitive sciences, 4*(1), 14-21.

Gentsch, A., Kathmann, N., & Schütz-Bosbach, S. (2012). Reliability of sensory predictions determines the experience of self-agency. *Behavioural Brain Research, 228*(2), 415-422. doi:<https://doi.org/10.1016/j.bbr.2011.12.029>

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

Haggard, P. (2017). Sense of agency in the human brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 18, 196. doi:10.1038/nrn.2017.14

Haggard, P., Clark, S., & Kalogeras, J. (2002). Voluntary action and conscious awareness. *nature neuroscience*, 5(4), 382.

Helbig, H. B., & Ernst, M. O. (2007). Optimal integration of shape information from vision and touch. *Exp Brain Res*, 179, 595-606.

Humphreys, G. R., & Buehner, M. J. (2009). Magnitude estimation reveals temporal binding at super-second intervals. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 35(5), 1542.

Humphreys, G. R., & Buehner, M. J. (2010). Temporal binding of action and effect in interval reproduction. *Experimental Brain Research*, 203(2), 465-470.

Imaizumi, S., & Tanno, Y. (2019). Intentional binding coincides with explicit sense of agency. *Consciousness and cognition*, 67, 1-15. doi:<https://doi.org/10.1016/j.concog.2018.11.005>

Kühn, S., Nenchev, I., Haggard, P., Brass, M., Gallinat, J., & Voss, M. (2011). Whodunnit? Electrophysiological Correlates of Agency Judgements. *PloS one*, 6(12), e28657. doi:10.1371/journal.pone.0028657

Majchrowicz, B., & Wierzchoń, M. (2018). Unexpected action outcomes produce enhanced temporal binding but diminished judgement of agency. *Consciousness and cognition*, 65, 310-324. doi:<https://doi.org/10.1016/j.concog.2018.09.007>

Moore, J. W. (2016). What Is the Sense of Agency and Why Does it Matter? *Frontiers in psychology*, 7(1272). doi:10.3389/fpsyg.2016.01272

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

Moore, J. W., & Haggard, P. (2008). Awareness of action: Inference and prediction. *Consciousness and cognition*, 17(1), 136-144. doi:<https://doi.org/10.1016/j.concog.2006.12.004>

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

Moore, J. W., Middleton, D., Haggard, P., & Fletcher, P. C. (2012). Exploring implicit and explicit aspects of sense of agency. *Consciousness and cognition*, 21(4), 1748-1753. doi:[10.1016/j.concog.2012.10.005](https://doi.org/10.1016/j.concog.2012.10.005)

Moore, J. W., Wegner, D. M., & Haggard, P. (2009). Modulating the sense of agency with external cues. *Consciousness and cognition*, 18(4), 1056-1064. doi:<https://doi.org/10.1016/j.concog.2009.05.004>

National Institute of Mental Health. (2019). Sensorimotor Domain Added to the RDoC Framework. Retrieved from <https://www.nimh.nih.gov/news/science-news/2019/sensorimotor-domain-added-to-the-rdoc-framework.shtml>

Olson, J. A., Landry, M., Appourchaux, K., & Raz, A. (2016). Simulated thought insertion: Influencing the sense of agency using deception and magic. *Consciousness and cognition*, 43, 11-26.

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

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

Ruess, M., Thomaschke, R., & Kiesel, A. (2018a). The time course of intentional binding for late effects. *Timing & Time Perception*, 6(1), 54-70.

Ruess, M., Thomaschke, R., & Kiesel, A. (2018b). Intentional binding of visual effects. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 80(3), 713-722. doi:10.3758/s13414-017-1479-2

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.

Sidarus, N., Vuorre, M., Metcalfe, J., & Haggard, P. (2017). Investigating the Prospective Sense of Agency: Effects of Processing Fluency, Stimulus Ambiguity, and Response Conflict. *Frontiers in psychology*, 8(545). doi:10.3389/fpsyg.2017.00545

Synofzik, M., Vosgerau, G., & Lindner, A. (2009). Me or not me—an optimal integration of agency cues? *Consciousness and cognition*, 18(4), 1065-1068.

Synofzik, M., Vosgerau, G., & Newen, A. (2008). Beyond the comparator model: a multifactorial two-step account of agency. *Consciousness and cognition*, 17(1), 219-239.

Synofzik, M., Vosgerau, G., & Voss, M. (2013). The experience of agency: an interplay between prediction and postdiction. *Frontiers in psychology*, 4.

Timm, J., Schönwiesner, M., Schröger, E., & SanMiguel, I. (2016). Sensory suppression of brain responses to self-generated sounds is observed with and without the perception of agency. *Cortex*, 80, 5-20.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.03.018>

Tomassini, A., Gori, M., Burr, D., Sandini, G., & Morrone, C. (2011). Perceived duration of Visual and Tactile Stimuli Depends on Perceived Speed. *Frontiers in integrative neuroscience*, 5(51). doi:10.3389/fnint.2011.00051

Vaillancourt, D. E., & Newell, K. M. (2003). Aging and the time and frequency structure of force output variability. *Journal of Applied Physiology*, 94(3), 903-912.
doi:10.1152/japplphysiol.00166.2002

Wang, Z., Magnon, G. C., White, S. P., Greene, R. K., Vaillancourt, D. E., & Mosconi, M. W. (2015). Individuals with autism spectrum disorder show abnormalities during initial and subsequent phases of precision gripping. *Journal of neurophysiology*, 113(7), 1989-2001.

Wegner, D. M. (2002). *The Illusion of Conscious Will*: MIT Press.

Wegner, D. M., Sparrow, B., & Winerman, L. (2004). Vicarious agency: experiencing control over the movements of others. *Journal of personality and social psychology*, 86(6), 838.

Wegner, D. M., & Wheatley, T. (1999). Apparent mental causation: Sources of the experience of will. *American Psychologist*, 54(7), 480.

Weller, L., Schwarz, K. A., Kunde, W., & Pfister, R. (2017). Was it me? – Filling the interval between action and effects increases agency but not sensory attenuation. *Biological Psychology*, 123, 241-249.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.biopspsycho.2016.12.015>

Wenke, D., Fleming, S. M., & Haggard, P. (2010). Subliminal priming of actions influences sense of control over effects of action. *Cognition*, 115(1), 26-38.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2009.10.016>

Wenke, D., & Haggard, P. (2009). How voluntary actions modulate time perception. *Experimental Brain Research*, 196(3), 311-318.

Wolpert, D. M. (1997). Computational approaches to motor control. *Trends in cognitive sciences*, 1(6), 209-216.

Wolpert, D. M., & Ghahramani, Z. (2000). Computational principles of movement neuroscience. *nature neuroscience*, 3, 1212-1217.

Zorn, C. J. (2001). Generalized estimating equation models for correlated data: A review with applications. *American Journal of Political Science*, 470-490.

CHAPITRE IV

ATYPICAL IMPLICIT AND EXPLICIT SENSE OF AGENCY IN AUTISM: AN INTERMEDIATE PHENOTYPE LINKING MOTOR AND SOCIAL CLINICAL FEATURES ?

Alexis Lafleur^a, Vicky Caron^a, Baudouin Forgeot d'Arc^b and Isabelle Soulières^{*a}

^{*}Corresponding author : soulieres.isabelle@uqam.ca

^aDépartement de Psychologie, Université du Québec à Montréal, Montréal Qc, Canada H2X 3P2.

^bDépartement de Psychiatrie, Université de Montréal, Montréal Qc, Canada H3T 1J4.

Note : En raison des contraintes liées à la pandémie de COVID-19, la complétion de cet article a été retardée. L'article suivant est rédigé à partir des données finales de l'étude, mais sa forme pourrait être amenée à être éditée durant le processus de publication dans une revue spécialisée. L'article sera soumis pour publication sous peu.

Abstract

There exist early indications that sense of agency (SoA), the cognitive function that allows experiencing oneself as the cause of one's own movements and their sensory outcomes, is altered in autism. SoA could also constitute an intermediate phenotype linking cardinal clinical features of autism, such as well-known socio-communicative impairments and growingly recognized motor difficulties. We designed an innovative SoA task based on recent Cue integration approaches (Synofzik, Vosgerau, & Voss, 2013) in order to establish a first complete characterization of SoA functioning in autism. Intentional binding and judgments of agency were used to assess implicit and explicit SoA over pinching movements with visual outcomes. Retrospective sensorimotor cues and contextual cues were manipulated using feedback alteration and induced belief about the plausible causes of action's outcome. Manual dexterity/coordination and Theory of Mind abilities were assessed using the Purdue Pegboard Test and the Reading the Mind in the eyes Test. Our results show that both implicit and explicit levels of SoA, as well as the dynamic between the two levels, present atypicalities in autism. At the implicit level, abolished intentional binding effect suggests altered formation of internal models of action with visual outcomes. At the explicit level, we found an under-reliance on retrospective sensorimotor cues on which neurotypical individuals usually base their judgments of agency. Counter to the neurutypical group, autistic people globally showed an association between greater time estimations and "me" judgements of agency. However, the autistic group showed greater heterogeneity and three distinct subgroups could be outlined from time estimation patterns. Individuals with autism showed decreased concomitant manual dexterity/coordination and Theory of Mind abilities. Motor difficulties were associated with explicit SoA atypicalities.

Keywords

Sense of agency, Autism, Intentional binding, implicit and explicit level, Motor cognition, Theory of Mind, social interactions, manual dexterity and coordination, internal models of action

Atypical Implicit and Explicit Sense of Agency in Autism: an intermediate phenotype linking motor and social clinical features ?

4.1 Introduction

Alterations in social communication and interactions is the first diagnostic criterion and a cardinal feature of Autism Spectrum Disorder (ASD; American Psychiatric Association, 2013). Although they are often considered secondary symptoms, motor impairments and action control alterations are highly prevalent and a growing number of researchers are calling for their inclusion as core clinical features of ASD (e.g. Bhat, Landa, & Galloway, 2011; Fournier, Hass, Naik, Lodha, & Cauraugh, 2010; Mostofsky & Ewen, 2011; Wilson, Enticott, & Rinehart, 2018). Traditional social cognitive models, such as the Theory of Mind (ToM) alteration hypothesis (Baron-Cohen, Leslie, & Frith, 1985), suggested the most prevalent characteristic of the autistic cognitive phenotype was a developmental delay in the capacity to create meta-representations of the mental states of others (Baron-Cohen, 1989), but were criticized for their inability to account for other important clinical manifestations (Rajendran & Mitchell, 2007). Indeed, such theory does not propose an explanation for the concomitance of socio-communicative deficits on one hand and motor impairments and action control alterations, such as deficits in coordination (Fournier et al., 2010; Kaur, M. Srinivasan, & N. Bhat, 2018), manual dexterity (e.g. Whyatt & Craig, 2013) and dyspraxia (e.g. MacNeil & Mostofsky, 2012) the other hand. With growing evidence that autistic symptoms severity is associated with the intensity of motor and action control alterations (Dziuk et al., 2007; Gizzonio et al., 2015; Ohara, Kanejima, Kitamura, & P. Izawa, 2020) and that motor alterations could precede social difficulties in development (Esposito, Venuti, Maestro, & Muratori, 2009), it has been suggested that sensorimotor dysfunctions (Mosconi & Sweeney, 2015) and motor cognition alterations (Casartelli, Molteni, & Ronconi, 2016) could constitute

an intermediate phenotype linking motor and socio-communicative manifestations of autism.

The Sense of Agency (SoA) refers to the subjective experience of being the cause of one's own actions (Gallagher, 2000; Haggard, 2017) and to the capacity to distinguish their consequences in the external world from the consequences of others' actions (Balconi, 2010). It is a cognitive function classified as a construct of the sensorimotor system by the Research Domain Criteria framework (National Institute of Mental Health, 2019) and its study offers a conceptual framework creating bridges between internal, sensorimotor processes and interpersonal, social processes. The study of SoA in the general population and in several neuropsychiatric conditions, such as schizophrenia and obsessive-compulsive disorder, has drawn a growing amount of interest in the last decade and has led to significant advances in theoretical models. However, only a few studies have specifically investigated SoA in autism (see Lafleur, Soulières, & Forgeot d'Arc, 2016; Zalla & Sperduti, 2015 for detailed reviews) and the majority of them have not been designed based upon promising recent theoretical models, such as the Cue integration approach (Moore & Fletcher, 2012; Synofzik, Vosgerau, & Newen, 2008; Synofzik, Vosgerau, & Voss, 2013). This approach postulates that SoA can be divided into an implicit and an explicit level that serve different functions (Synofzik, Vosgerau, et al., 2008). The Cue integration approach also establishes that different sensorimotor and contextual cues are integrated as a function of their availability and reliability at each level (Moore & Fletcher, 2012; Synofzik et al., 2013) to allow an optimal experience of agency and effective motor control. Although there exists early evidence that SoA is altered in autism (Sperduti, Pieron, Leboyer, & Zalla, 2014; Zalla, Miele, Leboyer, & Metcalfe, 2015), the integration mechanisms that may be altered and their links with motor and social manifestations of autism remain unknown.

4.1.1 Implicit SoA in neurotypical and autistic individuals

Implicit SoA consists of a pre-reflexive representation of action as being caused by oneself or not (Synofzik, Vosgerau, et al., 2008), is largely rooted in the sensorimotor system and allows rapid registration of agency, fast motor adaptation (Desmurget & Grafton, 2000) and reduction of noise in the sensory system via sensory attenuation (Blakemore, Wolpert, & Frith, 1998). Implicit SoA is conceptualized from a well-established computational model of motor control (Wolpert, 1997; Wolpert & Ghahramani, 2000), as it was first proposed by an earlier influential model of SoA (Comparator model of SoA; Frith, Blakemore, & Wolpert, 2000). In this account, the execution of a goal-directed, coordinated movement relies upon the formation of internal models of action. The intention to produce a trained goal-directed action leads to the selection of an inverse model (Kawato, 1999), the motor plan that is the most likely to achieve the selected goal, conceptualized in terms of a desired sensory state. The inverse model then gives rise to a motor command that is sent to the limbs in order to execute the movement and to a forward model that contains predictions about the sensory consequences of the movement (Miall, Weir, Wolpert, & Stein, 1993). The forward model is then compared to actual sensory feedback in the posterior parietal cortex, likely in the inferior parietal lobule (David, 2010). According to the Comparator Model of SoA, a match between expected and actual sensory feedback leads one to perceive the action and its outcomes as self-caused. Information issuing from this “comparator” can be seen as a *retrospective* sensorimotor cue to SoA as it is available after the execution of action.

Self-produced actions are also accompanied by a subjective shift in the perception of the time of occurrence of both the action and the outcome towards one another, a phenomenon coined as intentional binding (IB; Haggard, Clark, & Kalogeras, 2002). This robust phenomenon occurs only in the presence of a voluntary movement (Engbert, Wohlschläger, Thomas, & Haggard, 2007; Moore & Obhi, 2012) and is a commonly used proxy of implicit SoA. It has been shown that, when the action’s

outcome is highly predictable, the temporal shift of the action towards the expected outcome still occurs even if the outcome is actually not presented (Moore & Haggard, 2008). This indicates that implicit self-agency can emerge despite a mismatch at the comparator and that signals preceding action execution, such as the forward model containing the sensory predictions, largely contribute to implicit SoA and to the IB effect. Those *prospective* sensorimotor cues, that is cues available before the execution of action, include forward models of action, but also action selection signals (Chambon & Haggard, 2012) from the dorsolateral prefrontal cortex (Khalighinejad, Di Costa, & Haggard, 2016) and free choice over action (Barlas & Kopp, 2018), as they have been shown to increase IB strength. Neurofunctional studies of IB have also identified that temporary disruption of the pre-supplementary motor area (p-SMA), a region thought to participate in translating intentions into motor commands (David, 2010), causes a significant decrease in the strength of the binding (Cavazzana, Penolazzi, Begliomini, & Bisiacchi, 2015; Moore, Ruge, Wenke, Rothwell, & Haggard, 2010).

To our knowledge, only two studies have investigated IB in autism, one in both the auditory and visual modalities (Sperduti et al., 2014) and one in the auditory modality only (Finnemann, Plaisted-Grant, Moore, Teufel, & Fletcher, 2020). These studies completed with adult participants suggest that the IB effect is abolished in autism for the visual modality, but that the IB effect is preserved in the auditory modality. Abolition of the IB effect for action with visual outcomes provide early evidence that implicit SoA is altered in autism and is compatible with studies finding alterations of prospective control of visually guided action and motor planning difficulties in autism. Indeed, different studies have identified atypicalities in autistic children in different aspects of feed-forward motor control for limb movements (Papadopoulos et al., 2012; Schmitz, Martineau, Barthélémy, & Assaiante, 2003; Wang et al., 2015). Motor planning difficulties have also been underlined by studies identifying dyspraxia in autistic children (Dziuk et al., 2007; Kaur et al., 2018; MacNeil &

Mostofsky, 2012). Sperduti et al. (2014) findings are also coherent with the emerging account of autism as a disorder in predictive coding (Lawson, Rees, & Friston, 2014; Sinha et al., 2014) stipulating an imbalance between the precision ascribed to sensory evidence in comparison to prior beliefs in different domains such as sensorimotor and social predictions. Although alterations in sensorimotor predictive mechanisms gathers more and more attention in autism research, it is still to confirm if implicit SoA alterations in autism specifically arise from difficulties with the integration of prospective sensorimotor cues.

4.1.2 Explicit SoA in neurotypical and autistic individuals

The explicit level of SoA can be described as a meta-cognitive, conscious experience of agency in which one's attribute the causality of an action and its outcomes to a specific agent (Synofzik, Vosgerau, et al., 2008). It is measured by verbal reports that are also called judgments of agency (JoA). The cue integration process at the explicit level integrates previously discussed sensorimotor cues with other *contextual* cues such as background beliefs about plausible causes of stimuli in the environment, evaluation of performance and emotional valence of outcome (Synofzik et al., 2013). For example, explicit SoA over one's own thoughts have been experimentally reduced by placing participants in a mock scientific apparatus allegedly capable of thought insertion (Olson, Landry, Appourchaux, & Raz, 2016). Explicit SoA over observed movements performed by others have also been elicited by coincidental instructions to move (Wegner, Sparrow, & Winerman, 2004). Meta-cognitive JoA are associated with increased activity in the anterior prefrontal cortex, a region linked to self-reflective processing (Miele, Wager, Mitchell, & Metcalfe, 2011). Synofzik et al. (2013) Cue integration model also implies that the two levels of agency are sequential and that the registration of agency at the implicit level is in itself a cue that can contribute to the integration process at work at the explicit level.

Before the emergence of contemporary theories of SoA, Russell (1996) and Russell and Hill (2001) hypothesized that a deficit in action monitoring, a concept that resembled the actual definition of SoA, could constitute a precursor of autistic socio-communicative difficulties. This hypothesis gave rise to three studies (Grainger, Williams, & Lind, 2014; Russell & Hill, 2001; Williams & Happé, 2009) using almost identical experimental paradigms, in which autistic children had to discriminate a visual stimulus under their control from distractors that moved randomly. Detection performances of autistic children were equivalent to those of neurotypical children in all of those studies. Early work on SoA in autism also include a study by David et al. (2008) conducted with autistic adults and using visual feedback alteration of a joystick trajectory controlled by participants. SoA was assessed via dichotomic JoA only and no differences in recognition of altered/unaltered feedback was found. However, as none of these experiments were designed with the influence of the Cue integration approach of SoA, these tasks could not untangle the relative contributions of sensorimotor and contextual cues to JoA. Equivalent detection performances could be based upon underlying atypical cue integration in autistic individuals. This hypothesis seems supported by a later study by Zalla et al. (2015) exploring explicit SoA in autistic adults, but using an innovative experimental task. Participants had to attain X targets with a cursor controlled by a computer mouse. Lag was introduced in the cursor to introduce unreliability in sensorimotor signals. Contextual cues were varied by offering feedback on performance, as success to attain an "X" target was followed by a specific sound. The authors found that autistic individuals based their JoA mainly on performance feedback, and less on cursor/movement congruency than neurotypical individuals, suggesting an under-reliance on sensorimotor cues in explicit SoA. Interestingly, this tendency was also correlated to lower performances on the Faux-Pas Recognition Task (Baron-Cohen, O'riordan, Stone, Jones, & Plaisted, 1999), assessing Theory of Mind abilities. However, although Zalla and Sperduti (2015) have hypothesized alteration of prospective, but spared retrospective mechanisms, the relative

contribution of prospective/retrospective sensorimotor and contextual cues to explicit SoA have yet to be assessed in an experiment where they can be fully untangled.

To our knowledge, no studies have investigated both implicit and explicit levels of SoA in an autistic sample. Therefore, there is no available data on the relationship between implicit and explicit SoA in autism. Hence, we were also interested in investigating the dynamic between those two levels and in evaluating the relative contribution of implicit registration of agency to the explicit level in autistic individuals.

4.1.3 Characterizing the autistic cognitive profile for SoA by specifying cue integration processes

Therefore, the objectives of the present experiment were manifold. First, we sought to provide a first complete characterization of the autistic cognitive profile for SoA using the Cue integration approach of SoA. Secondly, we intended to determine if autistic individuals presented altered cue integration processes at implicit and explicit levels of SoA, by examining the relative contributions of *prospective/retrospective* sensorimotor and contextual cues to SoA proxies. Then, we wanted to evaluate the relative contribution of the implicit registration of agency to the explicit level and to characterize the dynamic between the two levels of SoA. Finally, we sought to determine if there exists an association between potentially altered mechanisms of SoA and important clinical features of autism, such as socio-communicative as well as motor difficulties. To do so, we administered to a sample of autistic adults, and to neurotypical matched controls, a psychophysics task simultaneously assessing implicit and explicit SoA for a given action, using respectively IB and dichotomic JoA. Participants were asked to perform multiple pinching movements on a dynamometer for which we controlled SoA cues reliability. Retrospective sensorimotor and contextual cues were respectively manipulated with feedback alteration and inducement of a belief about the number of agents that could be the cause of action's outcome. Participants were also asked to complete two

neuropsychological tasks assessing manual coordination/dexterity and Theory of Mind abilities. For implicit SoA, we expected reduced IB effect in autistic individuals, as a result of underreliance on available *prospective* sensorimotor cues. For explicit SoA, we anticipated that autistic individuals would base their JoA to a greater extent on contextual cues than on sensorimotor cues. We also expected that weak IB strength and under-reliance on sensorimotor cues would be associated with lower performances on manual dexterity/coordination and ToM neuropsychological tests. Finally, we expected ToM and manual dexterity/coordination difficulties' intensity to be concomitant.

4.2 Methods

4.2.1 Participants

Twenty-three adults with a clinical diagnosis of either ASD, according to DSM-5 (American Psychiatric Association, 2013), or of Asperger Syndrome or High Functioning Autism according to DSM-IV-TR (American Psychiatric Association, 2000) were recruited from the participants database of the specialized autism clinic of Rivière-des-Prairies Hospital (Montreal, Canada) and from an online add. One autistic participant was excluded from study after admitting lack of compliance to task instructions. All diagnoses were established by expert psychiatrists or expert psychologists based on clinical interviews and clinical questionnaires. The vast majority of diagnoses were established at the specialized clinic of the hospital associated with the research groups. A few participants were diagnosed at external clinics, but the research team revised every evaluation report to ensure the validity of the diagnosis. Because certain comorbidities are frequently associated with autism, autistic participants who reported having a diagnosis of Attention-deficit/hyperactivity Disorder (ADHD), depression or anxiety disorder and/or the use of antidepressant, anxiolytic or a psychostimulant medication were included in the

study. Potential participants reporting other psychiatric diagnoses and/or the use of other classes of psychoactive medication were excluded.

Twenty-two neurotypical volunteers were also recruited to be part of a control group matched for age, intellectual functioning (IQ) and gender. One neurotypical participant was also excluded for non-compliance to the task, leading to extreme values on the implicit agency measure. Neurotypical participants were screened to ensure none had previous history of psychiatric or neurodevelopmental disorders or were using, on a regular basis, medication that could alter psychological functioning. Characteristics of the recruited samples are described in Table 1. Independent t-tests and a Pearson's Chi-Square test of homogeneity were conducted to verify whether groups differed on age, gender and intellectual functioning. No significant differences were observed between the two groups on any of those parameters, even before applying a Bonferroni correction for multiple comparisons.

Table 1: Characteristics of the two recruited samples

| | Austistic group | Neurotypical group | Statistic | p |
|------------|--------------------|--------------------|------------------|-------|
| n | 22 | 21 | | |
| Age (M±SD) | 30.14 ± 6.53 | 27.71 ± 6.01 | $t = 1.264$ | 0.213 |
| IQ | 105.55 ± 14.20 | 111.52 ± 14.02 | $t = -1.389$ | 0.172 |
| Gender | 77,27% men | 61,90% men | $\chi^2 = 1.203$ | 0.273 |

All recruited participants reported being right-handed, having no diagnosed neurological or motor disabilities and having a normal or corrected to normal vision. Participants' intellectual functioning scores were obtained via the participants database or were assessed using WAIS-IV (Wechsler, 2008). All participants had a full-scale IQ score of minimally 80 (WISC-III, WAIS-III or WAIS-IV). The study was approved by local health authorities Ethics Committee. Written informed consent

was obtained from participants before the study and renewed after the false belief procedure.

4.2.2 General procedure

The experiment consisted of three tasks and the order of completion of these tasks was counterbalanced across participants. When IQ data was not available in the participants database, the WAIS-IV was administered after the completion of the three experimental tasks. All tasks were administered during a single visit at the hospital facilities.

4.2.3 Sense of agency task

We used a SoA psychophysics task previously developed by our group and whose sensitivity has been validated in the general population (Lafleur, Soulières, & Forgeot d'Arc, 2020). Participants were seated in front of a computer screen and their right forearm was laying down in a custom-made arm brace with a 90° flexion. Participants had to use their right hand thumb and index to perform pinching movements on a strain-gauge isometric force sensor (Hand dynamometer, Vernier Software and Technology, Beaverton, Or). The device was calibrated to participants' maximal voluntary contraction (MVC). Pinching movements were followed by the apparition of a green flash on the screen and the height of this flash was determined by the force applied on the dynamometer. Interval reproduction (implicit SoA measure) and dichotomic JoA (explicit SoA measure) were obtained after each trial via computer mouse buttons that were controlled by participants' left hand. We employed the temporal reproduction method developed by Humphreys and Buehner (2010), consisting in the reproduction of the perceived interval by a sustained mouse click.

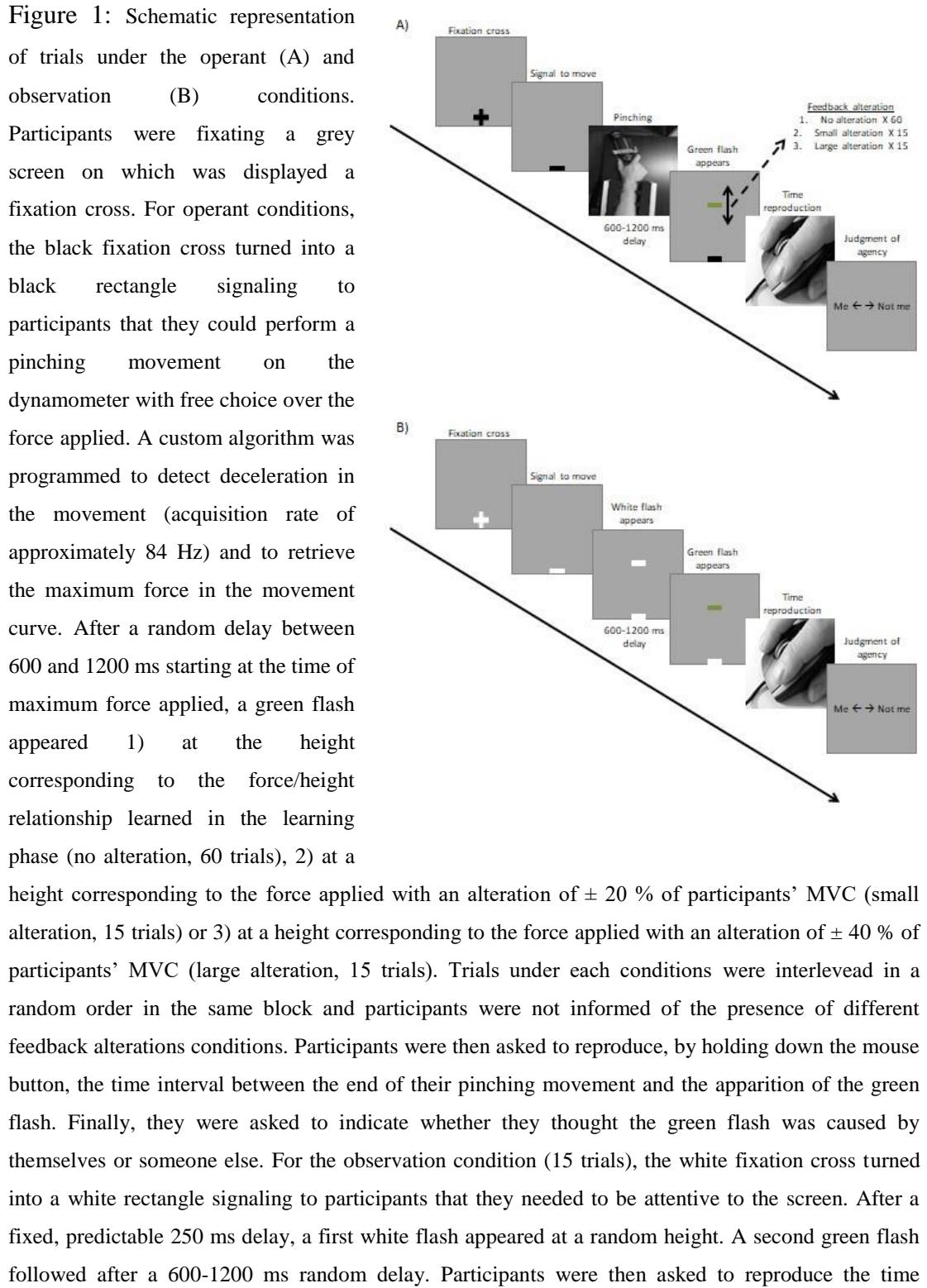
The SoA task was preceded by a learning phase that allowed the formation of an internal model of action for pinching movements and their visual outcomes. It consisted of a total of 90 interleaved (3 X 30) trials where participants pressed on the dynamometer in order to hit a target corresponding to respectively 20 %, 50 % and

80 % of the participant's MVC. Participants were asked to press on the dynamometer with a simple, quick pinching movement and they were informed that a harder press on the dynamometer would result in the flash appearing higher on the screen. On each trial, the green flash appeared on the screen after a random delay of 600-1200 ms at a height corresponding to the force employed. Participants could learn to control the dynamometer by comparing the intended height with their actual performance.

The main task was then performed by participants under two different social contexts: the *One agent* and *Two agent* contexts, whose order was counterbalanced across participants. Prior beliefs about agency were manipulated with instructions given to participants before the completion of each context. The main task consisted of a series of trials under four conditions: *no alteration*, *small alteration*, *large alteration* conditions (those three taken together, operant conditions) and an *observation* condition (see trials presentation details in Figure 1). In the operant conditions, participants were asked to freely select a mental target height on the screen and to perform a pinching movement on the dynamometer to cause a green flash to appear after a random delay. The random delay of 600 to 1200 ms was programmed to start at the time of the force peak and to end with the apparition of the green flash. In the *no alteration* condition, the green flash appeared on the screen at the height corresponding to the true force applied by participants, according to the force-height relationship of the learning phase. In the *small alteration* and *large alteration* conditions, the spatial congruency of the green flash was manipulated by adding or subtracting 20 or 40 % of participant's MVC, respectively. All operant conditions were indistinctively preceded by a black fixation cross and beginning of the trial was signaled by the transformation of the cross into a rectangle. The *observation* condition was preceded by a white fixation cross and beginning of the trial was also signaled by the transformation of the cross into a rectangle. A predictable white flash of a random duration between 50 to 100 ms was presented at a random height on the screen. After a random delay between 600 and 1200 ms, a green flash appeared at the

same position. After each trial of each condition, participants were asked to reproduce the time interval between the end of event #1 (pinching motion or white flash) and the beginning of event #2 (green flash) by holding in one button of the computer mouse. They were also asked to answer whether “Me” or “Not me” caused the green flash.

The task described as above was performed under two contexts. Trials conditions were identical and the context varied only in instructions given to participants. In the *One agent context*, participants were instructed previously to the start of the block that they would be the only ones controlling the green flashes and that the flashes would appear to the height corresponding to the force/height relationship of the learning phase. Before the *two agent* context, participants were instead instructed that they would control the height of the green flashes for a certain amount of trials only. They were told that the experimenter would be another agent able to control the height of the green flashes on their screen, and this, for an unknown and unpredictable amount of trials. In order to induce this false belief in a convincing manner, the experimenter ostentatiously connected a network cable from the experimental device to a second computer located in the same room, but which screen was hidden to participants’ view.



interval between the end of the first white flash and the apparition of the second green flash. They were again asked to determine whether they had caused the green flash or not.

4.2.4 Assessment of autistic social and motor manifestations

The *Reading the Mind in the Eyes Test* (RMET; Baron-Cohen, Wheelwright, Hill, Raste, & Plumb, 2001) was administered to assess Theory of Mind abilities, a subdomain of social cognition in which autistic individuals may experiment difficulties. All participants completed once the 36 items consisting of a picture of the eyes' portion of a human face. Participants were asked to select, among four words, which one best represent the state of mind of the person.

Motor abilities were assessed using the *Purdue Pegboard Test* (Tiffin, 1968), a neuropsychological test of digital dexterity and bimanual coordination that was first designed to assess fine motor abilities. The test is realized on a wood board with, at the top, four pits containing small metal pins and pieces and, below, two columns of small holes. The four subtests were performed three times by each participant and scores were calculated by averaging the three trials. Subtests consist of 1-inserting as much pins in the holes as possible in 30 s using the right hand, 2-using the left hand, 3-using simultaneously the right and left hands and 4-construct as much assemblies of 4 metal pieces together in 60 s with alternating right and left hands. All subtask scores were combined into a global Purdue score representing general manual coordination and dexterity abilities.

4.2.5 Measures and data analysis

Implicit level: intentional binding

IB was used as implicit SoA proxy and was measured using a temporal reproduction method. In order to be able to compare time intervals varying between 600 and 1200 ms, we computed a relative reproduction error (RRE) index for each trial ([objective

inter-events interval – subjective inter-events interval] / [objective inter-events interval]). A negative RRE represented the degree to which the objective interval was underestimated by participants. A greater negative RRE on operant conditions than on observation condition indicated an IB effect. Analyses were run using IBM SPSS statistics v26. We ran a repeated measures factorial ANOVA using a linear mixed model approach (LMM) with groups (*autistic, neurotypical*), social contexts (*one agent, two agent*) and experimental conditions (*observation, no alteration, small alteration, large alteration*) as independent variables and RRE as a dependent variable. All factors were set as fixed effects and the variance-covariance structure as compound symmetry.

Explicit level: Judgments of agency

We measured the explicit level of agency using a dichotomous verbal proxy (“Me” or “Not me”). We ran a repeated measures logistic regression using a generalized linear mixed model approach (GLMM) with groups (*autistic, neurotypical*), social context (*one agent, two agent*) and experimental conditions (*observation, no alteration, small alteration, large alteration*) as independent variables and dichotomic judgments of agency as the dependent variable. This analysis was run with the pooled neurotypical sample.

Relationship between implicit and explicit SoA

To assess the contribution of implicit agency to explicit JoA, we ran a repeated measures logistic regression using a generalized linear mixed model approach (GLMM) adding the RRE continuous variable to the other independent factors, that is groups (*autistic, neurotypical*), social context (*one agent, two agent*) and experimental conditions (*observation, no alteration, small alteration, large alteration*). Dichotomic JoA were used as the dependent variable. There are contexts, such as effect modification by several factors, where adjusting α -value higher than the conventional 0.05 threshold is justified (Thiese, Ronna, & Ott, 2016), and it has been used in

medical (Lee et al., 2011) and biological (Carranza Martin, Coleman, Garcia, Furnus, & Relling, 2018) research, for example. Indeed, setting an α -value of 0.1 for quadruple interaction terms reduces the risk of excessive type II errors and can reveal relevant effects, especially when size effect is large. Therefore, for this multifactorial analysis, α -value was set at 0.05 for simple, double and triple effects and at 0.1 for quadruple interactions effects.

Social and motor difficulties and their relationship to SoA atypicalities

We used the global score of the RMET (total of 36 items) and the global combined score on the Purdue Pegboard (Purdue score) to assess social and motor manifestations. We used independent-sample t-tests to assess group differences on those two tasks. Before running the analyses, the normality of distributions of each factor in each group was assessed by visual inspection of the distribution histograms. Purdue scores were normally distributed for both groups, but RMET scores for the ASD group contained an extreme low score (9). This score was winsorized by replacing it by a score corresponding to 3 SD from the mean when computing the mean without the extreme score (14.14). Bonferroni corrections were applied for multiple comparisons. Effect size was calculated using Cohen's d and were interpreted using Cohen (1988) guidelines.

We then computed SoA indicators that corresponded to SoA functioning atypicalities in the autistic group for 1- the implicit level and 2- the explicit level. The computation of those indicators is detailed in the results section 1.3.3. To assess the association between social and motor performances, as well as SoA functioning, we ran a set of Pearson's moment-product correlations. Because the sample was relatively small for clinical social and motor manifestations (only one iteration by participants, as opposed to dozens of iterations for SdA measures) and in order to preserve statistical power, we ran the correlation analysis on the two groups as a whole. This is also coherent with our hypotheses, as we expect differences between group to arise in terms of intensity (levels of the clinical and SoA indicators) and not

in terms of the nature of the association between the factors. The sequential Holm-Bonferroni correction (Holm, 1979) was applied to p-values, as this method allows to avoid type I errors as adequately as the more simple Bonferroni correction while preserving a better statistical power (Aickin & Gensler, 1996). We setted our statistical significance threshold at 0.05 but decided to report alpha-values between 0.10 and 0.05 as statistical trends, as it is an accepted procedure to avoid excessive type II errors in analyses completed over small samples (Schumm, Pratt, Hartenstein, Jenkins, & Johnson, 2013).

4.3 Results

4.3.1 Effect of social context and feedback alteration on implicit measure

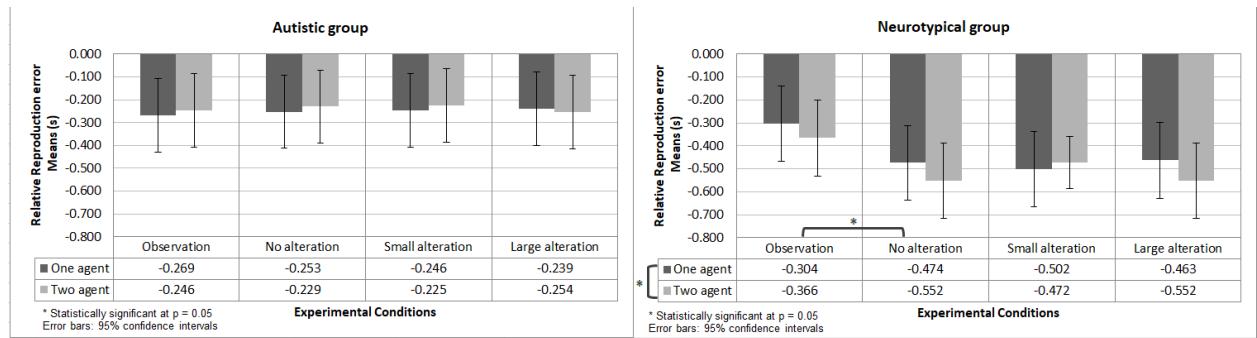


Figure 2: RRE means across experimental conditions and social contexts for autistic and neurotypical groups

The linear mixed model analysis for RRE showed significant main effects of Experimental condition ($F(3,8987) = 23.28; p < 0.001$) and Social context ($F(1,8987) = 10.19; p < 0.05$), but not of Group ($F(1,43) = 3.96; p = 0.053$). More importantly significant Group X Social context ($F(1,8987) = 23.44; p < 0.001$), and Group X Experimental condition ($F(3,8987) = 34.09; p < 0.001$) interactions. Triple

interaction was not significant ($F (3,8987) = 0.50; p = 0.681$). RRE means for each group are represented in Figure 2.

Different post-hoc pairwise comparisons of RRE means were run. Alpha values of 0.05 were used and adjusted for multiple comparisons using the Bonferroni correction. Social context X Group contrast revealed a significant difference between *One agent* and *Two agent* contexts in the neurotypical group ($\Delta M = 0.065; p < 0.001$). RRE means were not different across social contexts in the autistic group ($\Delta M = 0.013; p = 0.238$).

Table 2: Within group comparisons of RRE means across experimental conditions

| Group | Social context | Condition | Comparison | Mean Difference | p |
|--------------|-------------------------------------|------------|------------|-----------------|-------|
| Autistic | Combined (no effect of phase) | obs. | No alt. | -0.016 | 1 |
| | | | Small alt. | -0.022 | 1 |
| | | | Large alt. | -0.011 | 1 |
| | | No alt. | Small alt. | -0.006 | 1 |
| | | | Large alt. | 0.005 | 1 |
| | | Small alt. | Large alt. | 0.011 | 1 |
| Neurotypical | One agent | obs. | No alt. | 0.171 < 0.001* | |
| | | | Small alt. | 0.198 < 0.001* | |
| | | | Large alt. | 0.160 < 0.001* | |
| | | No alt. | Small alt. | 0.280 | 1 |
| | | | Large alt. | -0.011 | 1 |
| | | Small alt. | Large alt. | -0.380 | 0.814 |
| | Two agent | obs. | No alt. | 0.186 < 0.001* | |
| | | | Small alt. | 0.186 < 0.001* | |
| | | | Large alt. | 0.169 < 0.001* | |
| | | No alt. | Small alt. | 0.000 | 1 |
| | | | Large alt. | -0.016 | 1 |
| | | Small alt. | Large alt. | -0.016 | 1 |

* p < 0.05, statistically significant; alt.=>alteration; obs.=>observation

Within-group comparisons of Experimental conditions showed that, in the autistic group, none of RRE means differed across experimental conditions. In the neurotypical group, RRE means of all three operant conditions significantly diverged from the RRE mean of the observation condition, and this, in both the *One agent* and

Two agent contexts. However, still for the neurotypical group, none of the RRE means in the operant conditions differed between them (see Table 2).

Between-group comparisons (Social contexts X Experimental conditions X Groups) showed that RRE means for the observation condition did not differ across groups in neither the *One agent* ($\Delta M = 0.034$; $p = 0.766$) nor *Two agent* ($\Delta M = 0.120$; $p = 0.300$) contexts. However, RRE means of operant conditions in the *One agent* context differed in a significant or marginally significant way: *no alteration* ($\Delta M = 0.221$; $p = 0.056$), the *small alteration* ($\Delta M = 0.256$; $p < 0.05$) and the *large alteration* ($\Delta M = 0.225$; $p = 0.056$). RRE means of operant conditions in the *Two agent* context also all differed significantly between groups: *no alteration* ($\Delta M = 0.322$; $p < 0.01$), the *small alteration* ($\Delta M = 0.327$; $p < 0.01$) and the *large alteration* ($\Delta M = 0.281$; $p < 0.05$).

Taken together, those results confirm the presence of an IB effect for pinching movements with visual outcomes in the neurotypical group for all operant conditions. In that group, social context had a limited, but significant impact on binding strength. Feedback alteration had no impact on IB strength for that group. No IB effect was detected in the autistic group, as RRE means for all operant conditions were equivalent to the RRE mean in the observation condition. The IB effect, which is a robust finding in the general population, can therefore be seen as globally abolished in our sample of autistic participants. Neither social context nor feedback alteration had an impact on IB strength in the autistic group.

4.3.2 Effect of social context and feedback alteration on explicit measures

The generalized linear mixed model analysis for JoA showed significant main effect of Social context ($F(1,9014) = 233.05$; $p < 0.001$) and Experimental condition ($F(3,9014) = 439.18$; $p < 0.001$), but the main effect of Group was not significant ($F(1,9014) = 0.57$; $p = 0.449$). Significant interaction effects were found for Context X

Condition ($F(3,9014) = 13.05; p < 0.001$), Context X Group ($F(1,9014) = 13.50; p < 0.001$) and Condition X Group ($F(3,9014) = 12.84; p < 0.001$). More importantly, the triple interaction effect was significant ($F(3,9014) = 3.07; p < 0.05$). Self-attribution levels (or “Me” answer level) for each condition of each context in each group are depicted in Figure 3.

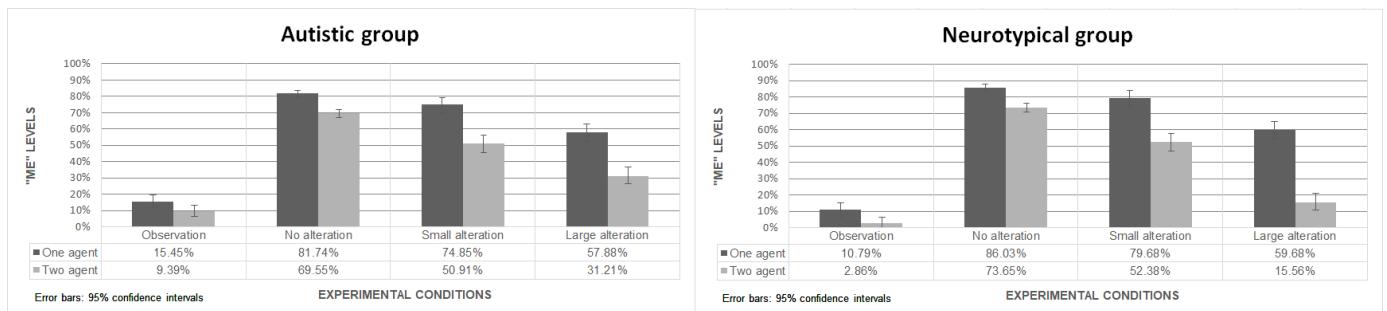


Figure 3: Self-attribution levels at the explicit level of SoA for autistic and neurotypical groups

To further investigate the triple interaction effect, we decomposed every factor of the interaction. Decomposing for social contexts, we found that the double interaction Condition X Group was significant for both the *One agent* ($F(3,4507) = 3.56; p < 0.05$) and the *Two agent* ($F(1,4507) = 11.43; p < 0.001$) contexts. Within group pairwise comparisons of experimental conditions for each group and context are therefore presented in the first section of Table 3. Alpha values of $p < 0.05$ were used and Bonferroni corrections were applied for all pairwises comparisons of “Me” levels. Odds ratio were calculated for every pairwise comparisons to assess size effect. For example, the first odds ratio of 0.041 in Table 3 can be interpreted as meaning that the chances for an autistic participant to answer “me” in the *One agent* context is 24.39 ($1 / 0.041$) times higher in the *no alteration* condition than in the *observation* condition. The second odds ratio of 1.504 indicates that an autistic participant had 1.504 more chances of answering “me” in the *no alteration* condition than in the *small alteration* condition, still for the *One agent* context.

Table 3: Post-hoc pairwise comparisons for self-attribution levels at the explicit level of SoA

| Within group comparisons of conditions for each context | | | | | | | | | | | |
|--|--------------------------|---------|----------|------------|--------------------|-----------|--------------------------|----------|------------|----------|------------|
| Autistic group | | | | | Neurotypical group | | | | | | |
| Context | Comparison | t | df | p | Odds ratio | Context | Comparison | t | df | p | Odds ratio |
| One agent | Obs. vs No alt. | -19.93 | 9014 | < 0.001* | 0.041 | One agent | Obs. vs No alt. | -20.599 | 9014 | < 0.001* | 0.020 |
| One agent | No alt. vs Small alt. | 2.921 | 9014 | < 0.01* | 1.504 | One agent | No alt. vs Small alt. | 2.883 | 9014 | < 0.01* | 1.570 |
| One agent | Small alt. vs Large alt. | 4.774 | 9014 | < 0.001* | 2.166 | One agent | Small alt. vs Large alt. | 5.563 | 9014 | < 0.001* | 2.649 |
| One agent | Obs. vs Small alt. | -14.59 | 9014 | < 0.001* | 0.061 | One agent | Obs. vs Small alt. | -15.521 | 9014 | < 0.001* | 0.031 |
| One agent | Obs. vs Large alt. | -10.817 | 9014 | < 0.001* | 0.133 | One agent | Obs. vs Large alt. | -11.369 | 9014 | < 0.001* | 0.082 |
| One agent | No alt. vs Large alt. | 8.979 | 9014 | < 0.001* | 3.258 | One agent | No alt. vs Large alt. | 9.756 | 9014 | < 0.001* | 4.160 |
| Two agent | Obs. vs No alt. | -14.969 | 9014 | < 0.001* | 0.045 | Two agent | Obs. vs No alt. | -10.922 | 9014 | < 0.001* | 0.011 |
| Two agent | No alt. vs Small alt. | 6.587 | 9014 | < 0.001* | 2.202 | Two agent | No alt. vs Small alt. | 7.472 | 9014 | < 0.001* | 2.541 |
| Two agent | Small alt. vs Large alt. | 5.348 | 9014 | < 0.001* | 2.286 | Two agent | Small alt. vs Large alt. | 9.397 | 9014 | < 0.001* | 5.969 |
| Two agent | Obs. vs Small alt. | -10.048 | 9014 | < 0.001* | 0.100 | Two agent | Obs. vs Small alt. | -8.274 | 9014 | < 0.001* | 0.027 |
| Two agent | Obs. vs Large alt. | -6.45 | 9014 | < 0.001* | 0.228 | Two agent | Obs. vs Large alt. | -4.376 | 9014 | < 0.001* | 0.160 |
| Two agent | No alt. vs Large alt. | 12.764 | 9014 | < 0.001* | 5.034 | Two agent | No alt. vs Large alt. | 16.63 | 9014 | < 0.001* | 15.168 |
| Within group comparisons of contexts for each condition (One vs Two agent) | | | | | | | | | | | |
| Autistic group | | | | | Neurotypical group | | | | | | |
| Condition | t | df | p | Odds ratio | Condition | t | df | p | Odds ratio | | |
| Obs. | 2.412 | 9014 | < 0.05* | 1.763 | Obs. | 3.426 | 9014 | < 0.01* | 4.108 | | |
| No alt. | 7.248 | 9014 | < 0.001* | 1.960 | No alt. | 7.369 | 9014 | < 0.001* | 2.203 | | |
| Small alt. | 6.539 | 9014 | < 0.001* | 2.870 | Small alt. | 7.29 | 9014 | < 0.001* | 3.565 | | |
| Large alt. | 7.133 | 9014 | < 0.001* | 3.029 | Large alt. | 7.133 | 9014 | < 0.001* | 8.032 | | |
| Intergroup comparisons of the large alteration condition for each context (Autistic vs Neurotypical) | | | | | | | | | | | |
| One agent | | | | | Two agent | | | | | | |
| Condition | t | df | p | Odds ratio | Condition | t | df | p | Odds ratio | | |
| Large alt. | -0.300 | 9014 | 0.764 | 0.928 | Large alt. | 2.968 | 9014 | < 0.01* | 2.462 | | |

* p < 0.05, statistically significant; alt.=>alteration; obs.=>observation

Decomposing for groups, we found that the double interaction Condition X Context was significant for both the ASD group ($F(3,4616) = 3.27$; $p < 0.05$) and the Neurotypical group ($F(1,4402) = 11.40$; $p < 0.001$). Within group pairwise comparisons of contexts for each group and condition are therefore presented in the second section of Table 3.

Decomposing for experimental conditions, we found that the double interaction Condition X Context was not significant for the *observation condition* ($F(1,1286) = 2.67$; $p = 0.102$). Effect of Group was also insignificant for this condition ($F(1,1286) = 1.38$; $p = 0.240$). For the no alteration condition, the double interaction Condition X Context ($F(1,5156) = 0.66$; $p = 0.418$) and the effect of Group ($F(1,5156) = 0.59$; $p = 0.444$) were not significant either. For the *small alteration* condition, the double interaction Condition X Context ($F(1, 1286) = 0.84$; $p = 0.358$) and the effect of

Group ($F(1, 1286) = 0.43; p = 0.514$) were again not significant. However, the Condition X Context interaction was significant for the *large alteration* condition ($F(1, 1286) = 16.93; p < 0.001$). This means that only the intergroup comparisons of the large alteration for each context was significant and of interest. Those comparisons are presented in the last section of Table 3. It is important to note that self-attribution levels were significantly lower for neurotypical participants in this condition only for the *Two agent* context ($t(9014) = 2.97; p < 0.01$). An autistic participant had indeed 2.462 more chances of answering “me” in the *large alteration* condition of the two agent context than a neurotypical participant, suggesting that, in a context where there was ambiguity about the actual cause of a sensory event, neurotypical individuals detected than used in a greater extent the large feedback disparity to attribute the causation of the flash to an external source.

4.3.3 Relationship between implicit and explicit SoA

The generalized linear mixed model analysis investigating the relationship between RRE and JoA showed significant main effect of RRE ($F(1,8998) = 6.93; p < 0.01$), Social context ($F(1, 8998) = 68.38; p < 0.001$) and Experimental condition ($F(3, 8998) = 439.18; p < 0.001$), but the main effect of Group was not significant ($F(1, 8998) = 0.73; p = 0.395$). For interaction effects, we focused on interaction terms containing the RRE factor as the relationship between RRE and JoA was the focus of this analysis. Significant double interaction effect was found for RRE X Condition ($F(3, 8998) = 8.62; p < 0.001$). Triple interaction effects were significant for RRE X Context X Group ($F(1, 8998) = 8.35; p < 0.01$). and for RRE X Condition X Group ($F(3, 8998) = 2.95; p < 0.05$). More importantly, the quadruple interaction effect was significant ($F(3, 8998) = 2.51; p = 0.057$).

To further investigate the quadruple RRE X Context X Condition X Group interaction effect, we chose to decomposed by group because group differences in the dynamic of the RRE-JoA relationship was the main focus of this analysis.

For the autistic group, the generalized linear mixed model analysis revealed no significant triple RRE X Context X Condition interaction effect ($F(1,4604) = 0.549$; $p = 0.649$) and only one significant interaction effect, that is the RRE X Condition effect ($F(1, 4604) = 22.23$; $p < 0.001$). Therefore, we further decomposed the analysis for all conditions running a model with RRE as the only factor using the data from one condition at a time. For the *observation* condition, fixed coefficient of -0.636 was not significant ($t = -1.784$; $p = 0.075$). Therefore, there was no observed relation between RRE and JoA for this group and condition. For the *no alteration* condition, fixed coefficient of 0.979 was significant ($t = 7.850$; $p < 0.001$). Odds ratio were of 2.662. This means that the chances for an autistic participant to answer “Me” in the no alteration condition were 2.662 more important with every gain of 1 s (or 1000 ms) on the RRE variable. For the *small alteration* condition, fixed coefficient of 1.007 was significant ($t = 4.342$; $p < 0.001$). Odds ratio were of 2.736. This means that the chances for an autistic participant to answer “Me” in the small alteration condition were 2.736 more important with every gain of 1 s (or 1000 ms) on the RRE variable. For the *large alteration* condition, fixed coefficient of 0.528 was significant ($t = 2.778$; $p < 0.05$). Odds ratio were of 1.696. This means that the chances for an autistic participant to answer “Me” in the large alteration condition were 1.696 more important with every gain of 1 s (or 1000 ms) on the RRE variable.

For the neurotypical group, the generalized linear mixed model analysis revealed no significant triple RRE X Context X Condition interaction effect ($F(1,4394) = 2.478$; $p = 0.059$) and only one significant interaction containing the RRE factor, that is the RRE X Context effect ($F(1, 4394) = 6.265$; $p < 0.05$). Therefore, we further decomposed the analysis for all conditions running a model with RRE as the only factor using the data from one context at a time. For the *One agent* context, fixed coefficient of -0.658 was significant ($t = -4.463$; $p < 0.001$). Odds ratio were of 0.518. This means that the chances for an neurotypical participant to answer “Me” in the Two agent context were 1.931 (1/0.518) more important with every reduction of 1 s

(or 1000 ms) on the RRE variable. For the *Two agent* context, fixed coefficient of -0.326 was significant ($t = -2.079$; $p < 0.05$). Odds ratio were of 0.722. This means that the chances for an neurotypical participant to answer “Me” in the Two agent context were 1.385 (1/0.722) more important with every reduction of 1 s (or 1000 ms) on the RRE variable.

4.3.4 Relationship between SdA alterations and manifestations of autism

Group comparisons of means for motor and social manifestations

Scores on the RMET were significantly lower for autistic participants on both social and motor functioning measures (see Table 4.4). Levene’s tests indicated equal variances for RMET scores ($F = 0.023$; $p = 0.880$) and for Purdue scores ($F = 3.120$; $p = 0.085$). Effect size for RMET and Purdue scores were both greater than 0.80 and therefore interpreted as large effects.

Table 4: Comparisons of mean scores on social and motor manifestations tests

| Mean \pm SD | Autistic group | Neurotypical group | t | df | Corrected p | Cohen’s d |
|---------------|------------------|--------------------|--------|----|---------------|-------------|
| RMET | 23.92 ± 3.98 | 27.10 ± 3.90 | -2.645 | 41 | $p < 0.05^*$ | 0.81 |
| Purdue | 47.01 ± 8.15 | 54.35 ± 6.22 | -3.307 | 41 | $p < 0.01^*$ | 1.01 |

Correlations between motor and social manifestations

The Pearson’s moment-product correlations analysis were run to investigate the relationship between the social and motor performances (RMET, Purdue) and the indicators of SoA functioning, and this, within each group separately. As analysis of

the SoA task's results revealed atypicalities in the autistic group in terms of the abolition of the IB effect in operant conditions and in terms of under-reliance on sensorimotor cues in ambiguous context, as showed by higher levels of self-attributed agency in the two agent context and large alteration condition, those parameters have been selected to serve as indicators of SoA functioning in the present correlation analysis. Binding strength in the operant conditions of both contexts (IB strength) was computed by subtracting the mean of RRE in trials in the observation condition to the mean of RRE in trials in all three operant conditions, and this, for both context for each participant. Therefore, an negative IB strength signals a strong IB effect for participants in the operant conditions of both context. Self-attribution levels in the two agent context and large alteration condition (Me/Two/Large) corresponds to the percentage of "Me" answers in this specific condition/context. SoA indicator refers respectively to implicit and explicit atypicalities found in the SoA task for the autistic group.

The normality of IBstrength and Me/Two/Large variables, as well as the normality of RMET and Purdue scores for the two groups combined, was assessed using a visual inspection of distribution histograms. IB strength was normally distributed for both groups. The Me/Two/Large variable contained an extreme value (100 %) that was winsorized. This value was replaced by a value that was equivalent to the mean + 3 SD when the mean was calculated without the extreme value (72.36). The analysis was run as one-tailed to reflect the directionality of the hypotheses previously put forward in the introduction and the Holm-Bonferroni procedure was applied. Results are presented in Table 5. Strength of association (r values) was interpreted following Cohen (1988).

Table 5: Correlations between social skills, motor performances and SoA atypicalities in the whole recruited sample

| Pearson's r | Purdue | RMET | IB strength | Me/Two/Large |
|---------------------|---|--|--|---|
| Purdue | | r = 0.409* <i>Corrected p < 0.01</i> | r = -0.211 <i>Corrected p = 0.088</i> | r = -0.315* <i>Corrected p < 0.05</i> |
| RMET | r = 0.409* <i>Corrected p < 0.01</i> | | r = -0.230 <i>Corrected p = 0.069</i> | r = -0.280 <i>Corrected p = 0.068</i> |
| IB strength | r = -0.211 <i>Corrected p = 0.088</i> | r = -0.230 <i>Corrected p = 0.069</i> | | r = 0.111 <i>Corrected p = 0.240</i> |
| Me/Two/Large | r = -0.315* <i>Corrected p < 0.05</i> | r = -0.280 <i>Corrected p = 0.068</i> | r = 0.111 <i>Corrected p = 0.240</i> | |

The results show that there exist a significant moderate positive correlation between Purdue and RMET scores ($r = 0.409$; corrected $p < 0.01$), indicating that ToM abilities and manual coordination/dexterity vary jointly within participants. Purdue scores were also correlated significantly to the Me/Two/Large factor ($r = -0.315$; corrected $p < 0.05$), the explicit SoA indicator. The negative moderate association point out that better motor abilities were associated with lower levels of “me” answers in the *large alteration* condition of the *Two agent* context. This mean that better manual coordination/dexterity comes with a better ability to identify and use feedback discrepancy to infer external agency. Purdue scores’ association with IBstrength, the implicit indicator of SoA, was only a statistical trend and was of small amplitude ($r = -0.211$; corrected $p = 0.088$). However, the trend tends to suggest that better motor scores are mildly associated with stronger IB effect, but this trend needs further validation.

The association between RMET scores and SoA indicators came out short of statistical significance, even though a statistical trend was observed. ToM abilities showed a trend towards small negative correlations with both implicit SoA indicator,

IB strength ($r = -0.230$; corrected $p = 0.069$), and explicit SoA indicator ($r = -0.280$; corrected $p = 0.068$). If those trends were to be confirmed by further studies, they would indicate that greater ToM abilities are mildly associated with a greater IB effect and a greater ability to identify and use feedback discrepancy to infer external agency.

4.4 Discussion

The present study's objectives were to provide a complete characterization of the autistic cognitive profile for SoA, to determine if autistic individuals display atypicalities in the integration of agency cues at implicit and explicit levels of SoA and to explore if those SoA atypicalities could represent an intermediate phenotype explaining a possible association between socio-communicative and motor difficulties. Hereafter, we discuss the alterations of SoA processes in autism observed in our study for the (1) implicit level of SoA, the (2) explicit level of SoA and for the (3) dynamic between implicit and explicit levels. We also discuss the (4) association of those observed atypicalities with social and motor manifestations.

4.4.1 Implicit SoA: abolished IB effect in autism as an indication of altered internal models of action

IB is a robust phenomenon found in the general population (Moore & Obhi, 2012) and consists in the compression of the subjective interval between an intentional action and its outcome (Haggard et al., 2002; Wenke & Haggard, 2009) in comparison to the subjective interval between two external events. As expected, we detected a clear IB effect for the pinching movements in our neurotypical sample, as all subjective intervals means in the operant conditions were underestimated in comparison to the intervals mean in the *observation* condition. However, the IB effect was globally abolished for all operant conditions among the group of autistic participants, as none of the subjective intervals means in the operation conditions

differed from the one in the *observation* condition. Abolition of the IB effect in the autistic group was also highlighted by the higher RRE means in every operant condition in the autistic group compared to the neurotypical group, meaning than they show a reduced under-estimation bias for action-outcome interval estimation for self-performed actions. Indeed, autistic participants' showed more veridical estimations of time in the operant conditions, as their reproductions of the intervals between actions and outcomes was, in average, closer to the objective intervals than those of neurotypical participants. This indicate that autistic individuals are less susceptible to the IB effect, in which a perceived compression of the action-outcome intervals creates a distinction between self-generated actions and outcomes and externally generated actions and outcomes. This confirms the results of Sperduti et al. (2014) who provided first indications that implicit SoA mechanisms were atypical in autism by showing that the IB effect was abolished for visual outcomes. It is to be noted that reproduced intervals means in the *observation* condition did not significantly differ across groups, strongly suggesting that the observed abolition of IB for visual outcomes is not the incidental consequence of time perception alterations in autism. Although it has been suggested that a time perception impairment might be a key characteristic of autism (Allman, DeLeon, & Wearden, 2011), a recent meta-analysis (Casassus, Poliakoff, Gowen, Poole, & Jones, 2019) concluded that evidence for a low-order time perception deficit in autism, implying processes such as detection, estimation or reproduction of time intervals for sensory events, is mixed and that no clear consensus can be established as of now. Our results point out that autistic participants actually showed no atypicalities in time perception and reproduction for external stimuli. This is congruent with a study by Price, Edgell, and Kerns (2012) concluding that Asperger's individuals show no alteration of their internal clock. Moreover, our results also suggest that autistic individuals offer more veridical time estimations for self-generated action-outcome intervals.

Our results also confirm that, in the neurotypical population, the IB effect is driven by prospective sensorimotor cues. Indeed, RRE means were equivalent in all three operant conditions in the neurotypical sample, indicating that the manipulation of the reliability of retrospective sensorimotor cues with a gradual alteration of feedback had no effect on IB strength. This implies that signals such as the presence of a forward model of action and action selection processes suffice to create an IB effect in the neurotypical population, which is also in line with studies showing that the actual identity or intensity of the action's outcome does not impact IB strength (Beck, Di Costa, & Haggard, 2017; Haering & Kiesel, 2014). We also observed significant effect of social contexts on IB strength for neurotypical participants, with reproduced intervals being less underestimated in the *One agent* context. It is compatible with (Desantis, Roussel, & Waszak, 2011) who showed that previous causal belief can impact IB strength. However, the effect we observed was markedly small, with differences between contexts averaging 65 ms, as opposed to differences in the order of 170 ms between the *observation* and operant conditions. This observed effect of social context on time reproduction is unlikely to have a major impact on SoA functioning, as the IB effect was still occurring in both social contexts despite the slightly lower underestimation in the *One agent* context. In contrast, in the group of autistic participants, none of the prospective sensorimotor, retrospective sensorimotor nor contextual cues had any impact on reproduced intervals. This indicates that implicit SoA in autism, as assessed with the IB proxy, is not informed by the prospective cues on which neurotypical individuals usually rely. It also confirms that IB for visual outcomes is globally absent in autism and that binding strength is not influenced in autistic individuals by alternative cues, namely retrospective sensorimotor or contextual cues. Therefore, the signature provided by IB, in the neurotypical population, for self-produced actions and outcomes is not observed in our autistic sample.

Prospective cues to implicit SoA arise from internal models that guide the enactment of actions, such as signals resulting from the selection of the inverse model or the production of a forward model that contains the sensory predictions. When learning a new movement, parietal cortices are involved in acquiring a “body” and a “motor” schemas (Daprati, Sirigu, & Nico, 2010) based on external sensory feedback (Koziol, Budding, & Chidekel, 2012). The cerebellum receives a copy of these schemas (Ito, 2005; Koziol et al., 2012), which results in the formation of internal model of action (Ebner, 2013; Ishikawa, Tomatsu, Izawa, & Kakei, 2016; Wolpert, Miall, & Kawato, 1998) containing the dynamic sensory and motor information to produce the action. The granule cells of the cerebellum receive inputs from multiple sensory fields, are able of multimodal integration and are thought to be involved in the production of a forward model for actions (Huang et al., 2013). These internal representations are refined and updated in the cerebellum with repetitions (Ito, 2008; Synofzik, Lindner, & Thier, 2008) in procedural learning and the most effective behaviours are relayed to, then memorized by, the motor cortex through cerebro-cerebellar circuitry (Galea, Vazquez, Pasricha, de Xivry, & Celnik, 2011; Houk et al., 2007). Pre-SMA and cerebellum are also thought to be involved in the recruitment of internal models in action preparation (Bursztyn, Ganesh, Imamizu, Kawato, & Flanagan, 2006).

Our results suggest that the process of formation and/or recruitment of internal models of actions is altered in autism, reducing the reliability and availability of such cues to SoA. There exists in fact robust evidence that the processes of internal models of action are altered in autism. It was showed that autistic children present an over-reliance on proprioceptive feedback, compared to visual feedback, when adapting their movements to unexpected alterations (Haswell, Izawa, Dowell, Mostofsky, & Shadmehr, 2009) and that this over-reliance on proprioception in motor control is specific to autism (Izawa et al., 2012). Autistic children also show enhanced learning from proprioceptive errors in motor control in comparison to neurotypical children, but reduced learning from visual errors (Marko et al., 2015). This suggests that the

formation of internal models of action is biased towards proprioceptive information in autism. This is of importance because most of skilled gestures required or learned in social interactions imply the visual modality. Indications that the formation of forward models of action is altered in autism also come from a growing amount of studies showing that feedforward control of movement is atypical. Examples of this include decreased accuracy in the initial force output to attain a target (Mosconi et al., 2015; Wang et al., 2015), higher error rates in a repetitive aiming task (Papadopoulos et al., 2012) and lack of anticipatory changes in muscle activity prior to a predictable change in load (Schmitz et al., 2003). Difficulties using visual feedback to adjust movements are also found (Ament et al., 2015; Mosconi et al., 2015) and visuo-motor difficulties are also found to be linked to autism symptoms severity (Miller, Chukoskie, Zinni, Townsend, & Trauner, 2014). Thus, our results added to those of these sensorimotor control studies seem to indicate that predictive mechanisms in motor control present significant alterations in autism. This observation is a clear contribution to broader account of autism such the predictive coding account (Lawson et al., 2014; Sinha et al., 2014).

The hypothesis that abolition of IB in autism is an indication of an altered formation of internal models of action is also compatible with an implication of the cerebellum and the cerebro-cerebellar circuitry. Indeed, the cerebellum plays a crucial role in internal models formation and there exists a consensus that autism is associated with different cerebellar anatomy and cerebellar-related motor and cognitive alterations (Fatemi et al., 2012). Neurofunctional data shows that movements of autistic adults are associated with reduced activity in p-SMA and cerebellar hemispheres (Takarae, Minshew, Luna, & Sweeney, 2007). Reduced activation of the sensorimotor portions of the cerebellum in autism also correlates with difficulties in using visual feedback to adapt movements (Marko et al., 2015). Finally, asynchrony between the activations of visual and motor systems in movement is correlated to autistic symptoms severity (Nebel et al., 2016).

One limit to our demonstration that implicit SoA for actions with visual outcomes is altered in autism is that we used a proxy (IB) in which prospective cues are known to play a prominent role. Sensory attenuation corresponds to a reduced perceived intensity for self-generated stimuli in comparison of externally generated stimuli (Blakemore, Wolpert, & Frith, 2000), and is also a common behavioral proxy of implicit SoA. As sensory attenuation requires the matching of forward model's predictions and actual sensory reafference at the comparator to occur, it can be seen as an implicit SoA proxy that is based on retrospective sensorimotor cues. Our experiment cannot rule out that self-generated actions within autistic individuals find a signature via this phenomenon, as sensory attenuation have been found to be spared in autism in the tactile modality when measured with verbal reports and force matching (Blakemore et al., 2006; Finnemann et al., 2020). To the opposite, van Laarhoven, Stekelenburg, Eussen, and Vroomen (2019) have found abolished sensory attenuation in autism for movement with auditory outcomes when assessing it with evoked potentials. However, we emphasize the importance to also assess SoA using visual outcomes, as skilled gestures implied in communication and social interactions are strongly guided via visuo-motor integration (with the exception of speech). To our knowledge, no studies have investigated sensory attenuation for visual stimuli in autism. Experimental procedures to evaluate sensory attenuation for visual stimuli have however been used in the general population (e.g. Cardoso-Leite, Mamassian, Schütz-Bosbach, & Waszak, 2010). A clear indication of an abolition of sensory attenuation could confirm that internal models of action for visual outcomes are not available or unreliable in autistic individuals, while spared sensory attenuation would suggest that it's rather the process of recruitment of the forward model in order to drive the IB effect that is affected.

4.4.2 Explicit SoA: under-reliance on sensorimotor cues to inform JoA in autism

Our results for the dichotomic JoA measure revealed that our autistic sample showed one important atypicality in the way they established their JoA at the explicit level of SoA. While both autistic and neurotypical groups showed similar global patterns of JoA, as evidenced by reduced general levels of self-attribution in the *One agent* context in comparison to the *Two agent* context and a gradual reduction in “me” answers with an increase in feedback alteration, intergroup comparisons did reveal a significant difference in their explicit SoA functioning. Indeed, autistic individuals showed higher levels of self-attribution in the *large alteration* condition of the *Two agent* context. This difference was the only one highlighted between groups.

Reflecting on this effect, we underline that, in the *Two agent* context, there existed ambiguity about the plausible cause of the action’s outcome. Therefore, contextual cues provided no reliable information for determining the JoA and *prospective* and *retrospective* sensorimotor cues were the only available cues that would allow to discriminate between self- and externally- produced stimuli. Examining the contribution of *retrospective* cues in this context, while both groups showed a gradual decrease in self-attribution levels with increased feedback alteration, the extent to which autistic and neurotypical participants used large discrepancies in the predictable vs actual height of the green flashes to inform their JoA significantly differed. Indeed, when feedback was unaltered or was only slightly altered, self-attribution levels were equivalent across the groups. However, as mentioned, self-attribution levels were significantly higher in the autistic group for the *large alteration* condition and autistic participants had, in fact, 2.46 more chances of answering “me” in this condition of feedback alteration than neurotypical participants. This indicates that autistic individuals in our sample were significantly less likely to use the diagnostic information that provides a large feedback discrepancy in order to infer external agency about the action’s outcome. In contrast,

when actual feedback was either unaltered or altered only in a subtle way, autistic individuals presented a pattern of JoA identical to neurotypical individuals. This important result suggests that autistic individuals display an under-reliance on diagnostic *retrospective* sensorimotor cues that strongly indicate external agency.

Equivalent self-attribution levels between the groups for the *no* and *small alteration* conditions, and higher levels for the autistic group in the *large alteration* condition, also suggest that *prospective* sensorimotor cues and the registration of implicit agency, as assessed by IB, did not contribute to the establishment of JoA at the explicit level. Indeed, even if neurotypical participants showed an IB effect, driven by *prospective* cues, in all operant conditions, this effect did not translate to the explicit level in the form of increased self-attribution levels in comparison to autistic participants, whom showed abolished IB. *Retrospective* sensorimotor cues seem therefore to dominate the explicit level of SoA in the absence of reliable contextual cues. This is in line with studies that have investigated visuospatial alteration of a movement's outcome over explicit SoA in the general population (Farrer, Bouchereau, Jeannerod, & Franck, 2008; Saito, Takahata, Murai, & Takahashi, 2015; Sidarus, Vuorre, Metcalfe, & Haggard, 2017). Autistic individuals, however, appear to show an under-reliance on this type of cues.

Taken together, our results for both the implicit and the explicit level of SoA allow us to revisit Zalla and Sperduti's (2015) hypothesis that SoA atypicalities in autism might be characterized by impaired prospective mechanisms and spared retrospective mechanisms. Their proposition ensued notably from their own work, as they observed abolished IB effect in the visual modality (Sperduti et al., 2014), which strongly suggest altered *prospective* sensorimotor cue integration at the implicit level. Our experiment confirms altered integration of *prospective* sensorimotor cues at the implicit level. However, the contribution of *retrospective* sensorimotor cues to implicit SoA in autism has to be further tested with implicit proxies of SoA that are

sensitive to *retrospective* processes such as sensory attenuation. We propose that future research solve this issue by assessing sensory attenuation in the more meaningful visual modality.

Zalla's group also explored the influence of different agency cues on explicit SoA. In Zalla et al. (2015), participants had to attain targets under different conditions that manipulated contextual cues (performance feedback) and sensorimotor cues (alteration of temporal and spatial congruency of the cursor). Their results showed that autistic adults' explicit feeling of control over the cursor was less sensitive to feedback alterations than the one of neurotypical individuals. We argue that the hypothesis of spared retrospective mechanisms is not in line with the results of this experiment. Indeed, we believe that their experiment about explicit SoA (Zalla et al., 2015) constitutes a strong indication that autistic individuals' integration process at this level under-rely on *retrospective* sensorimotor cues, as feedback alteration signals arise from the comparator mechanism and become available only *after* the completion of the action. The results of our current experiment also support that *retrospective* sensorimotor cues' integration process at the explicit level is altered, as diagnostic signals arising from large feedback alteration did not lead to the same reduction of self-attributed JoA in the autistic group. Unfortunately, the contribution of *prospective* sensorimotor cues to explicit SoA is difficult to interpret in both Zalla's and our group experiments, because their effect cannot be fully untangled from contextual or *retrospective* cues effects at that level. This methodological limitation could be overcome in future research with paradigms using transcranial magnetic stimulation device to alter the activity of cerebral regions associated with the comparator, isolating prospective cues' contribution to the explicit SoA experience.

Also, our experiment indicates that the autistic functioning of explicit SoA is influenced in the same way than the one of neurotypical individuals by the induced

belief that they were the only plausible cause of action's outcome. This is compatible with Zalla et al. (2015)'s experiment, where they showed that autistic individuals used the contextual cues provided in the same fashion as neurotypical participants. However, the agency belief that we used in our experiment was a contextual cue that is prospective in nature as it was available before the action, while performance feedback, the contextual cue provided in the Zalla et al. (2015)'s experiment, is rather retrospective, as it was made available only after the completion of the movement. It leads us to think that the prospective/retrospective distinction cannot by itself explain all the atypicalities encountered in the functioning of both levels of SoA in autistic individuals.

In a nutshell, contrary to early studies about action monitoring in autism that used experimental tasks not allowing to manipulate the availability or reliability of different agency cues (David et al., 2008; Grainger et al., 2014; Russell & Hill, 2001; Williams & Happé, 2009), our results clearly show that autistic individuals present an atypicality in explicit SoA functioning. Our results rather confirm Zalla et al.'s (2015) findings that autistic individuals show atypical cue integration with an under-reliance on diagnostic sensorimotor cues, precising however that the integration of *retrospective* sensorimotor cues is the one aspect of explicit SoA that is altered in autism.

4.4.3 Relationship between implicit and explicit SoA: a window into autistic heterogeneity in SoA functioning ?

Group comparisons allowed us to shed light on the presence of atypicalities in the autistic functioning of SoA at both implicit and explicit levels, by underlining the overall abolition of the IB effect for the implicit level and by underlining the under-reliance on retrospective sensorimotor cues to infer external agency at the explicit level. However, our experiment was also designed to allow a trial by trial analysis of the relationship between our implicit marker (time reproduction) and the explicit

marker (dichotomic JoA). One of the strength of evaluating this relationship for a single action at a time is that it is more sensitive to heterogeneity within one group and to heterogeneity between action trials within an individual, preserving this heterogeneity from the effect of pooling for group average. Synofzik et al. (2013) cue integration model predicts that the registration of agency at the implicit level is in itself a cue that enters the weighing process at the explicit level. So far, even for the general population, only a few number of studies have investigated the contribution of IB to the explicit level on a trial by trial basis. Pyasik, Burin, and Pia (2018) and Imaizumi and Tanno (2019) have found a significant association between IB and explicit JoA. In a study of SoA functioning in the general population using the same psychophysics task as the one used in this studies, our group had previously reported having found no significant association between our measure of IB and dichotomous JoA (Lafleur et al., 2020). However, for this study, we employed a more powerful statistical model (generalized linear mixed model vs generalized estimating equation for the previous study) that allowed us to now detect this time an association between time reproductions and self-attribution levels for the neurotypical group.

Indeed, our present results indicate that there exist an association between the IB effect and self-attribution levels at the explicit level in the neurotypical group. A greater under-estimation of the action-outcome interval was associated with a greater chance of answering “me” at the explicit level in all four conditions of the *One agent* context. Odds ratio were of 1.93 (1 / 0.518), meaning that for every 1000 ms reduction of the RRE variable, the chances for a neurotypical participant to answer “me” were 1.93 greater. This association was the same in the *Two agent* context for all conditions cofounded, but with odds ratio of a relatively smaller magnitude (1.38). Those results are compatible with Synofzik et al. (2013) conceptualization that stipulates that the registration of agency at the implicit level that is integrated at the explicit level in the establishment of a conscious, explicit JoA. The level of time under-estimation in the IB effect is generally of a 200 ms amplitude (for an example,

see Humphreys & Buehner, 2010). This means, for example, that the chances of answering “me” in a trial were there was a clear IB effect (200 ms under-estimation) compared to a trial were there was no binding (0 ms under-estimation) are 0.386 (*One agent* context) and 0.276 (*Two agent* context) greater. This clarifies the relevant contribution of IB to explicit agency, as this signature of self-generated action in the sensorimotor system seems to feed the integration process that takes place at the explicit level. We still want to underline, though, that the estimation of effect size, using odds ratio, confirm that only the integration of several different cues can fully explain the determination of JoA at the explicit level. It is also interesting to note that ambiguity about the possible cause of the action’s outcome seems to reduce the weight of the implicit registration in the integration process at the explicit level, which is an argument in favour for context-dependant weighing in cue integration.

Our results for the autistic group contained notable differences with the results of the neurotypical group. The decomposition of the quadruple interaction for this group showed no effect of the social contexts on the strength of the association between time reproductions and JoA, but rather an impact of the experimental conditions. First, there was no significant link between RRE and JoA for the *observation* condition. However, all operant conditions saw a positive association between RRE and self-attribution levels, with odds ration of 2.662 for the *no alteration* condition, of 2.736 for the *small alteration* condition, and of 1.696 for the *large alteration* condition. Higher RRE values were indeed associated with greater probabilities that autistic participants attribute the causation of the green flash to themselves. Those results reveal that, in addition to atypicalities present at the implicit and explicit level, autistic people present on average atypicalities in the dynamic between the two levels of SoA. The overall abolition of the IB effect found in our analysis of the implicit level combined with the observation that higher values of time reproductions seem to contribute to higher level of self-attribution of agency further raise the question of the

signature of self-generated actions and outcomes in autistic individuals. Different potential explanations could account for the pattern of results observed.

In the first place, this trend could imply that subjective over-estimation of the objective time interval between action and outcome could be used by autistic individuals as a marker of self-agency. In this explanation, over-estimation would be an implicit proxy of self-agency that is opposite to the habitual IB effect recurrently found in the neurotypical population. The registration of agency at the implicit level would be attested by over-estimation of the objective intervals and this registration would constitute a cue that could enter the integration process at the explicit level. A second, alternative explanation would be that the subjective under-estimation of the action-outcome time interval could be used by autistic individuals as cue of external agency. In this explanation, the significance of this time contraction between an action and an outcome as a cue entering the explicit integration process would be the opposite of the one found in neurotypical individuals.

We also have to reconcile in our characterization of the autistic functioning of the two levels of SoA the finding that, overall, autistic individuals show an abolition of the IB effect while showing a positive association between RRE and JoA. This could be explained by the presence of a certain heterogeneity in our autistic sample that is masked by the averaging procedure of group differences analysis. To investigate this, we decided to conduct an exploratory *a posteriori* qualitative analysis of each participant time reproductions at the implicit levels to evaluate if there was different clusters of results' patterns. We generated graphs representing the RRE means in the observation vs the operant conditions combined for both contexts combined, and this, for each individual of the autistic group. We counted the number of participants that fitted the criterias for the three potential pattern of results: 1- under-estimation (RRE mean for operant conditions lesser than RRE mean for *observation*), 2- equal estimation (RRE mean for operant conditions within 100 ms of RRE mean for

observation) and 3- over-estimation (RRE mean for operant conditions is greater than RRE mean for *observation*). The results of this qualitative investigation are compelling as seven participants were placed in the under-estimation category, eight in the equal estimation category, and seven in the over-estimation category. In contrast, the neurotypical group saw 17 participants falling in the under-estimation category, four participants falling in the equal estimation category and none in the over-estimation category. This exploratory qualitative analysis seems to suggest that implicit SoA and implicit-explicit SoA dynamic is not heterogeneous in the autistic spectrum. Further research to characterize the autistic cognitive profile for SoA could investigate subgroups differences in SoA functioning and their associations with clinical features using larger sample groups.

4.4.4 Association between clinical features and SoA atypicalities: towards a greater recognition of behavioral and cognitive sensorimotor alterations

Although they are not diagnostic features, motor alterations are more and more recognized as cardinal clinical characteristics of autism (e.g. Bhat et al., 2011; Wilson et al., 2018). Analyses of group differences in performances on the neuropsychological tasks of this study support this perspective. Indeed, autistic individuals showed significantly lower scores on the Purdue Pegboard Test, that assess dexterity and manual coordination jointly. The effect size of group difference on manual dexterity/coordination was large. This result is coherent with a meta-analysis by Fournier et al. (2010), including 41 studies, that identified a large effect of ASD diagnosis on motor coordination performances. A recent study using a pegboard task adapted for children also observed lower performances that were specific to autism in comparison to other developmental conditions such as ADHD or alcoholic fetal syndrome (Lidstone, Miah, Poston, Beasley, & Dufek, 2020). Evidence that coordination and dexterity difficulties constitute important clinical manifestations of autism, present from a young age and persisting throughout adult life, thus seems to pile up.

The ToM alteration hypothesis (Baron-Cohen et al., 1985) has been one of the most influential cognitive theory of autism. This theory posits that an inability to create meta-representations of others' mental states is the core component of the cognitive phenotype of autistic individuals (Leslie & Thaiss, 1992). In our experiment, we have found a significant difference between our autistic and neurotypical groups on our measure of ToM abilities, that is the RMET (Baron-Cohen et al., 2001). Between group difference had a large effect size. Our result corroborate the presence of ToM difficulties in adults with autism and are concordant with a recent meta-analysis of RMET performances in autism, including 18 studies and a total of 608 participants with ASD, that has identified lower performances of autistic individuals compared to matched controls (Peñuelas-Calvo, Sareen, Sevilla-Llewellyn-Jones, & Fernández-Berrocal, 2019). Nonetheless, we emphasize that our results suggest that ToM difficulties do not appear to be of greater amplitude or more salient than coordination and dexterity difficulties when assessed by Purdue Pegboard and RMET, even though ToM difficulties have historically been more recognized.

SoA constitutes a central aspect of sensorimotor cognition (National Institute of Mental Health, 2019). Growing recognition that motor difficulties are frequent and cardinal features of autism has lead researchers to hypothesize that motor cognition alterations could constitute an intermediate phenotype linking motor and socio-communicative manifestations of autism (e.g. Casartelli et al., 2016). Therefore, we used the observed SoA atypicalities in autistic individuals in our psychophysics tasks as candidate markers of sensorimotor cognitive peculiarities, linked both to motor and social manifestations of autism. IB strength and under-reliance on *retrospective* sensorimotor cues have been used as markers of implicit and explicit level atypicalities, respectively, and their association with manual dexterity/coordination and ToM abilities has been explored. Because our sample size was relatively small (as clinical measures only have one iteration by participants), we analyzed the link

between social and motor function, as well as with SoA atypicalities on both groups altogether.

First, we found that manual dexterity/coordination difficulties were moderately associated with ToM difficulties, as Purdue and RMET scores were positively correlated. Those results are in line with numerous studies that have found that motor difficulties, such as dyspraxia or manual dexterity, co-vary with traditional, social manifestations of autism (Dziuk et al., 2007; Gizzonio et al., 2015; Ohara et al., 2020). As though the correlation analysis can only show an association and cannot demonstrate causality, our present results are compatible with the hypothesis that the development of ToM abilities might share a common basis with development of motor abilities. This is of importance in our path to understanding the autistic cognitive phenotype, as it suggests that motor and socio-communicative atypicalities should not be seen as two unrelated aspects of an individual's development.

In regards to the association between motor and social manifestations and SoA functioning, our strongest result was a moderate significant association between manual dexterity/coordination and the marker of explicit SoA functioning. Motor difficulties was indeed associated with the tendency to under-rely on diagnostic *retrospective* sensorimotor cues in order to infer agency at the explicit level. SoA atypicalities can be seen as characteristics of the sensorimotor cognitive profile of autistic individuals. This result give support to the conceptualization that motor difficulties at the behavioural level are accompanied by atypicalities in motor cognition profiles. Moreover, we identified a statistical trend for an association between manual dexterity/coordination difficulties and the marker of implicit SoA functioning, but this correlation was only of small magnitude. Associations between markers of implicit and explicit SoA and ToM abilities, as measured by RMET, were also statistical trend and were also of small magnitude.

We sought to determine if SoA atypicalities could be an aspect of the autistic cognitive profile linking concomitant coordination/dexterity and ToM difficulties, after it was suggested that sensorimotor dysfunctions (Mosconi & Sweeney, 2015) and motor cognition alterations (Casartelli et al., 2016) could constitute an intermediate phenotype linking motor and socio-communicative manifestations of autism. A similar theory, in which it was proposed that action-monitoring was a precursor of socio-communicative abilities, was also put forward by Russell (1996). Our results show a trend towards both motor and social manifestations of autism being linked to both implicit and explicit functioning of SoA, but our strongest finding remains the presence of a moderate association between motor performances and the tendency to rely on sensorimotor retrospective cue at the explicit level. This is interesting as Zalla et al. (2015) had previously identified that ToM, as assessed rather by the Faux-pas recognition Test, was associated with under-reliance on the same type of sensorimotor cues. Our two studies taken together strongly suggest that under-reliance on retrospective sensorimotor cues in the establishment of JoA is a compelling aspect of the autistic cognitive profile, as it seems connected to important clinical manifestations such as ToM difficulties and coordination and dexterity difficulties. Therefore, our results are compatible with the hypothesis that SoA could constitute an intermediate phenotype linking those two types of clinical manifestations. However, our study was limited by its correlational design and its relatively small sample. Hence, it can't provide direct evidence that the onset of motor difficulties leads to atypicalities in SoA functioning that in turn leads to difficulties in social cognition abilities, such as ToM.

We believe however that the idea that socio-communicative competence relies on skilled behaviour (Mostofsky & Ewen, 2011; von Hofsten & Rosander, 2012) and on the development of certain aspects of motor cognition such as the formation of forward models of action and SoA constitutes, more than ever, a compelling framework that needs to be further invested in the neurocognitive sciences of

autism. We suggest that coming studies adapt SoA experimental paradigms based on Cue integration approach so it becomes suitable to assess SoA functioning of autistic children of different age groups. Jointly assessing the development of motor behaviors, social cognition and SoA functioning in a longitudinal developmental perspective would allow to unravel the different onsets of the atypicalities observed and to determine if certain atypicalities hold a precedence over the others.

4.5 Conclusion

In the present study, we sought to establish a complete characterization of implicit and explicit SoA functioning in autism, using Cue integration approaches (Moore & Fletcher, 2012; Synofzik et al., 2013). We provide first evidence that SoA functioning in autism coincidentally presents atypicalities at both the implicit and explicit level, as well as peculiarities in the dynamic in the two levels' relationship. We found that the IB effect was in overall abolished in autistic individuals, highlighting reduced weight of *prospective* sensorimotor cues at the implicit level. This result strongly suggests altered formation of internal models of action in autism. We also demonstrated that the explicit level of SoA in autism was characterized by an under-reliance on diagnostic *retrospective* sensorimotor cues on which neurotypical individuals usually rely. We also established that the dynamic between implicit and explicit level were different between autistic and neurotypical individuals, as greater IB strength at the implicit level did not lead to greater self-attribution at the explicit level. On the contrary, the autistic group showed an overall association between greater time estimation and self-attribution level. We proposed however that the autistic group showed greater heterogeneity, with three different patterns of responses represented in this group. We believe these categories (under-estimation, equal estimation and over-estimation at the implicit level) should be further studied. Finally, we explored the relationship between SoA atypicalities at both levels and important social and motor clinical features, that is dexterity/coordination and ToM difficulties. We

observed that motor and social difficulties were strongly concomitant and that dexterity/coordination difficulties were moderately associated with explicit SoA atypicalities. We also observed a trend towards ToM difficulties being linked to SoA difficulties at both levels, but these associations have to be further evaluated. Taken together, our results confirm the presence of atypicalities in the autistic functioning of SoA at both levels and reassert the relevance of studying jointly motor and social difficulties in autism, as well as the underlying SoA functioning.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank Hugues Leduc for statistical counseling and Anthony Hosein for his contribution to experimental task programming.

FUNDING

This work was supported by career awards from Fonds de recherche du Québec – Santé (FRQS) to IS and BFA. AL received a doctoral award from FRQS. FRQS was not involved in the conduct of study or manuscript preparation.

DECLARATION OF CONFLICTS OF INTEREST

None.

REFERENCES

- Aickin, M., & Gensler, H. (1996). Adjusting for multiple testing when reporting research results: the Bonferroni vs Holm methods. *American journal of public health*, 86(5), 726-728. doi:10.2105/ajph.86.5.726

Allman, M. J., DeLeon, I. G., & Wearden, J. H. (2011). Psychophysical Assessment of Timing in Individuals With Autism. *American Journal on Intellectual and Developmental Disabilities, 116*(2), 165-178. doi:10.1352/1944-7558-116.2.165

Ament, K., Mejia, A., Buhlman, R., Erklin, S., Caffo, B., Mostofsky, S., & Wodka, E. (2015). Evidence for Specificity of Motor Impairments in Catching and Balance in Children with Autism. *Journal of autism and developmental disorders, 45*(3), 742-751. doi:10.1007/s10803-014-2229-0

American Psychiatric Association. (2000). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders DSM-IV-TR* (4th-Revised ed.). Washington: American Psychiatric Association.

American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders : DSM-5* (5th ed.). Washington, DC: American Psychiatric Publishing.

Balconi, M. (2010). The sense of agency in psychology and neuropsychology. In *Neuropsychology of the Sense of Agency* (pp. 3-22): Springer.

Barlas, Z., & Kopp, S. (2018). Action choice and outcome congruency independently affect intentional binding and feeling of control judgments. *Front Hum Neurosci, 12*, 137.

Baron-Cohen, S. (1989). The Autistic Child's Theory of Mind: a Case of Specific Developmental Delay. *Journal of child psychology and psychiatry, 30*(2), 285-297. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1989.tb00241.x>

- Baron-Cohen, S., Leslie, A. M., & Frith, U. (1985). Does the autistic child have a “theory of mind”? *Cognition*, 21(1), 37-46.
- Baron-Cohen, S., O'riordan, M., Stone, V., Jones, R., & Plaisted, K. (1999). Recognition of faux pas by normally developing children and children with Asperger syndrome or high-functioning autism. *Journal of autism and developmental disorders*, 29(5), 407-418.
- Baron-Cohen, S., Wheelwright, S., Hill, J., Raste, Y., & Plumb, I. (2001). The “Reading the Mind in the Eyes” Test revised version: a study with normal adults, and adults with Asperger syndrome or high-functioning autism. *The Journal of Child Psychology and Psychiatry and Allied Disciplines*, 42(2), 241-251.
- Beck, B., Di Costa, S., & Haggard, P. (2017). Having control over the external world increases the implicit sense of agency. *Cognition*, 162, 54-60.
- Bhat, A. N., Landa, R. J., & Galloway, J. C. (2011). Current Perspectives on Motor Functioning in Infants, Children, and Adults With Autism Spectrum Disorders. *Physical Therapy*, 91(7), 1116-1129. doi:10.2522/ptj.20100294
- Blakemore, S.-J., Tavassoli, T., Calò, S., Thomas, R. M., Catmur, C., Frith, U., & Haggard, P. (2006). Tactile sensitivity in Asperger syndrome. *Brain and cognition*, 61(1), 5-13.
- Blakemore, S.-J., Wolpert, D., & Frith, C. (2000). Why can't you tickle yourself? *Neuroreport*, 11(11), R11-R16.
- Blakemore, S.-J., Wolpert, D. M., & Frith, C. D. (1998). Central cancellation of self-produced tickle sensation. *nature neuroscience*, 1(7), 635-640.

- Bursztyn, L. L. C. D., Ganesh, G., Imamizu, H., Kawato, M., & Flanagan, J. R. (2006). Neural Correlates of Internal-Model Loading. *Current Biology*, 16(24), 2440-2445. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cub.2006.10.051>
- Cardoso-Leite, P., Mamassian, P., Schütz-Bosbach, S., & Waszak, F. (2010). A new look at sensory attenuation: Action-effect anticipation affects sensitivity, not response bias. *Psychological science*, 21(12), 1740-1745.
- Carranza Martin, A. C., Coleman, D. N., Garcia, L. G., Furnus, C. C., & Relling, A. E. (2018). Prepartum fatty acid supplementation in sheep. III. Effect of eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid during finishing on performance, hypothalamus gene expression, and muscle fatty acids composition in lambs. *Journal of animal science*, 96(12), 5300-5310. doi:10.1093/jas/sky360
- Casartelli, L., Molteni, M., & Ronconi, L. (2016). So close yet so far: Motor anomalies impacting on social functioning in autism spectrum disorder. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 63, 98-105.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.02.001>
- Casassus, M., Poliakoff, E., Gowen, E., Poole, D., & Jones, L. A. (2019). Time perception and autistic spectrum condition: A systematic review. *Autism Research*, 12(10), 1440-1462. doi:<https://doi.org/10.1002/aur.2170>
- Cavazzana, A., Penolazzi, B., Begliomini, C., & Bisacchi, P. S. (2015). Neural underpinnings of the ‘agent brain’: new evidence from transcranial direct current stimulation. *European Journal of Neuroscience*, 42(3), 1889-1894.
doi:<https://doi.org/10.1111/ejn.12937>

Chambon, V., & Haggard, P. (2012). Sense of control depends on fluency of action selection, not motor performance. *Cognition*, 125(3), 441-451.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2012.07.011>

Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Hillsdale, N.J.: L. Erlbaum Associates.

Daprati, E., Sirigu, A., & Nico, D. (2010). Body and movement: consciousness in the parietal lobes. *Neuropsychologia*, 48(3), 756-762.

David, N. (2010). Functional anatomy of the sense of agency: past evidence and future directions. *Neuropsychology of the sense of agency: From consciousness to action*, 69-80.

David, N., Gawronski, A., Santos, N. S., Huff, W., Lehnhardt, F.-G., Newen, A., & Vogeley, K. (2008). Dissociation between key processes of social cognition in autism: Impaired mentalizing but intact sense of agency. *Journal of autism and developmental disorders*, 38(4), 593-605.

Desantis, A., Roussel, C., & Waszak, F. (2011). On the influence of causal beliefs on the feeling of agency. *Consciousness and cognition*, 20(4), 1211-1220.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.concog.2011.02.012>

Desmurget, M., & Grafton, S. (2000). Forward modeling allows feedback control for fast reaching movements. *Trends Cogn Sci*, 4(11), 423-431. doi:10.1016/s1364-6613(00)01537-0

- Dziuk, M., Larson, J., Apostu, A., Mahone, E., Denckla, M., & Mostofsky, S. (2007). Dyspraxia in autism: association with motor, social, and communicative deficits. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 49(10), 734-739.
- Ebner, T. J. (2013). Cerebellum and internal models. In *Handbook of the cerebellum and cerebellar disorders* (pp. 1281-1296): Springer Netherlands.
- Engbert, K., Wohlschläger, A., Thomas, R., & Haggard, P. (2007). Agency, subjective time, and other minds. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33(6), 1261-1268. doi:10.1037/0096-1523.33.6.1261
- Esposito, G., Venuti, P., Maestro, S., & Muratori, F. (2009). An exploration of symmetry in early autism spectrum disorders: Analysis of lying. *Brain and Development*, 31(2), 131-138. doi:<https://doi.org/10.1016/j.braindev.2008.04.005>
- Farrer, C., Bouchereau, M., Jeannerod, M., & Franck, N. (2008). Effect of distorted visual feedback on the sense of agency. *Behavioural neurology*, 19(1, 2), 53-57.
- Fatemi, S. H., Aldinger, K. A., Ashwood, P., Bauman, M. L., Blaha, C. D., Blatt, G. J., . . . Dickson, P. E. (2012). Consensus paper: pathological role of the cerebellum in autism. *The Cerebellum*, 11(3), 777-807.
- Finnemann, J., Plaisted-Grant, K., Moore, J., Teufel, C., & Fletcher, P. (2020). Low-level, prediction-based sensory and motor processes are unimpaired in Autism. *bioRxiv*, 2020.2009.2001.277160. doi:10.1101/2020.09.01.277160
- Fournier, K. A., Hass, C. J., Naik, S. K., Lodha, N., & Cauraugh, J. H. (2010). Motor coordination in autism spectrum disorders: a synthesis and meta-analysis. *Journal of autism and developmental disorders*, 40(10), 1227-1240.

- Frith, C. D., Blakemore, S.-J., & Wolpert, D. M. (2000). Abnormalities in the awareness and control of action. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 355(1404), 1771-1788.
- Galea, J. M., Vazquez, A., Pasricha, N., de Xivry, J.-J. O., & Celnik, P. (2011). Dissociating the roles of the cerebellum and motor cortex during adaptive learning: the motor cortex retains what the cerebellum learns. *Cerebral cortex (New York, N.Y. : 1991)*, 21(8), 1761-1770. doi:10.1093/cercor/bhq246
- Gallagher, S. (2000). Philosophical conceptions of the self: implications for cognitive science. *Trends in cognitive sciences*, 4(1), 14-21.
- Gizzonio, V., Avanzini, P., Campi, C., Orivoli, S., Piccolo, B., Cantalupo, G., . . . Fabbri-Destro, M. (2015). Failure in pantomime action execution correlates with the severity of social behavior deficits in children with autism: a praxis study. *Journal of autism and developmental disorders*, 45(10), 3085-3097.
- Grainger, C., Williams, D. M., & Lind, S. E. (2014). Online action monitoring and memory for self-performed actions in autism spectrum disorder. *Journal of autism and developmental disorders*, 44(5), 1193.
- Haering, C., & Kiesel, A. (2014). Intentional Binding is independent of the validity of the action effect's identity. *Acta Psychologica*, 152, 109-119.
- Haggard, P. (2017). Sense of agency in the human brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 18, 196. doi:10.1038/nrn.2017.14
- Haggard, P., Clark, S., & Kalogeras, J. (2002). Voluntary action and conscious awareness. *nature neuroscience*, 5(4), 382.

Haswell, C. C., Izawa, J., Dowell, L. R., Mostofsky, S. H., & Shadmehr, R. (2009). Representation of internal models of action in the autistic brain. *nature neuroscience*, 12(8), 970-972.

Holm, S. (1979). A Simple Sequentially Rejective Multiple Test Procedure. *Scandinavian Journal of Statistics*, 6, 65-70.

Houk, J., Bastianen, C., Fansler, D., Fishbach, A., Fraser, D., Reber, P., . . . Simo, L. (2007). Action selection and refinement in subcortical loops through basal ganglia and cerebellum. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 362(1485), 1573-1583.

Huang, C.-C., Sugino, K., Shima, Y., Guo, C., Bai, S., Mensh, B. D., . . . Hantman, A. W. (2013). Convergence of pontine and proprioceptive streams onto multimodal cerebellar granule cells. *eLife*, 2, e00400. doi:10.7554/eLife.00400

Humphreys, G. R., & Buehner, M. J. (2010). Temporal binding of action and effect in interval reproduction. *Experimental Brain Research*, 203(2), 465-470.

Imaizumi, S., & Tanno, Y. (2019). Intentional binding coincides with explicit sense of agency. *Consciousness and cognition*, 67, 1-15.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.concog.2018.11.005>

Ishikawa, T., Tomatsu, S., Izawa, J., & Kakei, S. (2016). The cerebro-cerebellum: Could it be loci of forward models? *Neuroscience Research*, 104, 72-79.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.neures.2015.12.003>

Ito, M. (2005). Bases and implications of learning in the cerebellum—adaptive control and internal model mechanism. *Progress in brain research*, 148, 95-109.

- Ito, M. (2008). Control of mental activities by internal models in the cerebellum. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(4), 304-313.
- Izawa, J., Pekny, S. E., Marko, M. K., Haswell, C. C., Shadmehr, R., & Mostofsky, S. H. (2012). Motor Learning Relies on Integrated Sensory Inputs in ADHD, but Over - Selectively on Proprioception in Autism Spectrum Conditions. *Autism Research*, 5(2), 124-136.
- Kaur, M., M. Srinivasan, S., & N. Bhat, A. N. (2018). Comparing motor performance, praxis, coordination, and interpersonal synchrony between children with and without Autism Spectrum Disorder (ASD). *Research in Developmental Disabilities*, 72, 79-95. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ridd.2017.10.025>
- Kawato, M. (1999). Internal models for motor control and trajectory planning. *Current Opinion in Neurobiology*, 9(6), 718-727. doi:[https://doi.org/10.1016/S0959-4388\(99\)00028-8](https://doi.org/10.1016/S0959-4388(99)00028-8)
- Khalighinejad, N., Di Costa, S., & Haggard, P. (2016). Endogenous Action Selection Processes in Dorsolateral Prefrontal Cortex Contribute to Sense of Agency: A Meta-Analysis of tDCS Studies of ‘Intentional Binding’. *Brain Stimulation*, 9(3), 372-379. doi:<https://doi.org/10.1016/j.brs.2016.01.005>
- Koziol, L. F., Budding, D. E., & Chidekel, D. (2012). From movement to thought: executive function, embodied cognition, and the cerebellum. *The Cerebellum*, 11(2), 505-525.
- Lafleur, A., Soulières, I., & Forgeot d'Arc, B. (2020). Sense of agency: Sensorimotor signals and social context are differentially weighed at implicit and explicit levels.

Consciousness and cognition, 84, 103004.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.concog.2020.103004>

Lafleur, A., Soulières, I., & Forgeot d'Arc, B. (2016). Cognition sociale et sens de l'agentivité en autisme: de l'action à l'interaction. *Santé mentale au Québec*, 41(1), 163-181.

Lawson, R. P., Rees, G., & Friston, K. J. (2014). An aberrant precision account of autism. *Front Hum Neurosci*, 8. doi:10.3389/fnhum.2014.00302

Lee, G. M., Greene, S. K., Weintraub, E. S., Baggs, J., Kulldorff, M., Fireman, B. H., . . . Lieu, T. A. (2011). H1N1 and Seasonal Influenza Vaccine Safety in the Vaccine Safety Datalink Project. *American Journal of Preventive Medicine*, 41(2), 121-128. doi:10.1016/j.amepre.2011.04.004

Leslie, A. M., & Thaiss, L. (1992). Domain specificity in conceptual development: neuropsychological evidence from autism. *Cognition*, 43(3), 225-251.
doi:10.1016/0010-0277(92)90013-8

Lidstone, D. E., Miah, F. Z., Poston, B., Beasley, J. F., & Dufek, J. S. (2020). Manual dexterity in children with autism spectrum disorder: A cross-syndrome approach. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 73, 101546.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.rasd.2020.101546>

MacNeil, L. K., & Mostofsky, S. H. (2012). Specificity of dyspraxia in children with autism. *Neuropsychology*, 26(2), 165.

- Marko, M. K., Crocetti, D., Hulst, T., Donchin, O., Shadmehr, R., & Mostofsky, S. H. (2015). Behavioural and neural basis of anomalous motor learning in children with autism. *Brain*, 138(3), 784-797. doi:10.1093/brain/awu394
- Miall, R. C., Weir, D. J., Wolpert, D. M., & Stein, J. F. (1993). Is the cerebellum a smith predictor? *J Mot Behav*, 25(3), 203-216. doi:10.1080/00222895.1993.9942050
- Miele, D. B., Wager, T. D., Mitchell, J. P., & Metcalfe, J. (2011). Dissociating neural correlates of action monitoring and metacognition of agency. *Journal of cognitive neuroscience*, 23(11), 3620-3636.
- Miller, M., Chukoskie, L., Zinni, M., Townsend, J., & Trauner, D. (2014). Dyspraxia, motor function and visual–motor integration in autism. *Behavioural Brain Research*, 269, 95-102. doi:<https://doi.org/10.1016/j.bbr.2014.04.011>
- Moore, J. W., & Fletcher, P. C. (2012). Sense of agency in health and disease: A review of cue integration approaches. *Consciousness and cognition*, 21(1), 59-68. doi:<https://doi.org/10.1016/j.concog.2011.08.010>
- Moore, J. W., & Haggard, P. (2008). Awareness of action: Inference and prediction. *Consciousness and cognition*, 17(1), 136-144. doi:<https://doi.org/10.1016/j.concog.2006.12.004>
- Moore, J. W., & Obhi, S. S. (2012). Intentional binding and the sense of agency: a review. *Consciousness and cognition*, 21(1), 546-561.
- Moore, J. W., Ruge, D., Wenke, D., Rothwell, J., & Haggard, P. (2010). Disrupting the experience of control in the human brain: pre-supplementary motor area

contributes to the sense of agency. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, rspb20100404.

Mosconi, M. W., Mohanty, S., Greene, R. K., Cook, E. H., Vaillancourt, D. E., & Sweeney, J. A. (2015). Feedforward and Feedback Motor Control Abnormalities Implicate Cerebellar Dysfunctions in Autism Spectrum Disorder. *The Journal of Neuroscience*, 35(5), 2015. doi:10.1523/JNEUROSCI.2731-14.2015

Mosconi, M. W., & Sweeney, J. A. (2015). Sensorimotor dysfunctions as primary features of autism spectrum disorders. *Science China Life Sciences*, 58(10), 1016-1023. doi:10.1007/s11427-015-4894-4

Mostofsky, S. H., & Ewen, J. B. (2011). Altered connectivity and action model formation in autism is autism. *The Neuroscientist*, 17(4), 437-448.

National Institute of Mental Health. (2019). Sensorimotor Domain Added to the RDoC Framework. Retrieved from <https://www.nimh.nih.gov/news/science-news/2019/sensorimotor-domain-added-to-the-rdoc-framework.shtml>

Nebel, M. B., Eloyan, A., Nettles, C. A., Sweeney, K. L., Ament, K., Ward, R. E., . . . Mostofsky, S. H. (2016). Intrinsic Visual-Motor Synchrony Correlates With Social Deficits in Autism. *Biol Psychiatry*, 79(8), 633-641.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2015.08.029>

Ohara, R., Kanejima, Y., Kitamura, M., & P. Izawa, K. (2020). Association between Social Skills and Motor Skills in Individuals with Autism Spectrum Disorder: A Systematic Review. *European Journal of Investigation in Health, Psychology and Education*, 10(1), 276-296. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2254-9625/10/1/22>

Olson, J. A., Landry, M., Appourchaux, K., & Raz, A. (2016). Simulated thought insertion: Influencing the sense of agency using deception and magic. *Consciousness and cognition, 43*, 11-26.

Papadopoulos, N., McGinley, J., Tonge, B. J., Bradshaw, J. L., Saunders, K., & Rinehart, N. J. (2012). An investigation of upper limb motor function in high functioning autism and Asperger's disorder using a repetitive Fitts' aiming task. *Research in Autism Spectrum Disorders, 6*(1), 286-292.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.rasd.2011.05.010>

Peñuelas-Calvo, I., Sareen, A., Sevilla-Llewellyn-Jones, J., & Fernández-Berrocal, P. (2019). The "Reading the Mind in the Eyes" Test in Autism-Spectrum Disorders Comparison with Healthy Controls: A Systematic Review and Meta-analysis. *Journal of autism and developmental disorders, 49*(3), 1048-1061. doi:10.1007/s10803-018-3814-4

Price, K. J., Edgell, D., & Kerns, K. A. (2012). Timing deficits are implicated in motor dysfunction in Asperger's Syndrome. *Research in Autism Spectrum Disorders, 6*(2), 857-860. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rasd.2011.11.007>

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

Rajendran, G., & Mitchell, P. (2007). Cognitive theories of autism. *Developmental Review, 27*(2), 224-260. doi:<https://doi.org/10.1016/j.dr.2007.02.001>

Russell, J. (1996). *Agency: Its Role in Mental Development*: Erlbaum (UK) Taylor & Francis.

Russell, J., & Hill, E. L. (2001). Action-monitoring and Intention Reporting in Children with Autism. *Journal of child psychology and psychiatry*, 42(3), 317-328. doi:<https://doi.org/10.1111/1469-7610.00725>

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.

Schmitz, C., Martineau, J., Barthélémy, C., & Assaiante, C. (2003). Motor control and children with autism: deficit of anticipatory function? *Neuroscience letters*, 348(1), 17-20.

Schumm, W. R., Pratt, K. K., Hartenstein, J. L., Jenkins, B. A., & Johnson, G. A. (2013). Determining Statistical Significance (Alpha) and Reporting Statistical Trends: Controversies, Issues, and Facts. *Comprehensive Psychology*, 2, 03.CP.02.10. doi:10.2466/03.Cp.2.10

Sidarus, N., Vuorre, M., Metcalfe, J., & Haggard, P. (2017). Investigating the Prospective Sense of Agency: Effects of Processing Fluency, Stimulus Ambiguity, and Response Conflict. *Frontiers in psychology*, 8(545). doi:10.3389/fpsyg.2017.00545

Sinha, P., Kjelgaard, M. M., Gandhi, T. K., Tsourides, K., Cardinaux, A. L., Pantazis, D., . . . Held, R. M. (2014). Autism as a disorder of prediction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(42), 15220-15225. doi:10.1073/pnas.1416797111

Sperduti, M., Pieron, M., Leboyer, M., & Zalla, T. (2014). Altered pre-reflective sense of agency in autism spectrum disorders as revealed by reduced intentional binding. *Journal of autism and developmental disorders*, 44(2), 343-352.

- Synofzik, M., Lindner, A., & Thier, P. (2008). The Cerebellum Updates Predictions about the Visual Consequences of One's Behavior. *Current Biology*, 18(11), 814-818. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cub.2008.04.071>
- Synofzik, M., Vosgerau, G., & Newen, A. (2008). Beyond the comparator model: a multifactorial two-step account of agency. *Consciousness and cognition*, 17(1), 219-239.
- Synofzik, M., Vosgerau, G., & Voss, M. (2013). The experience of agency: an interplay between prediction and postdiction. *Frontiers in psychology*, 4.
- Takarae, Y., Minshew, N. J., Luna, B., & Sweeney, J. A. (2007). Atypical involvement of frontostriatal systems during sensorimotor control in autism. *Psychiatry Research: Neuroimaging*, 156(2), 117-127.
- Thiese, M. S., Ronna, B., & Ott, U. (2016). P value interpretations and considerations. *Journal of thoracic disease*, 8(9), E928-E931. doi:[10.21037/jtd.2016.08.16](https://doi.org/10.21037/jtd.2016.08.16)
- Tiffin, J. (1968). *Purdue pegboard examiner manual*: Science Research Associates.
- van Laarhoven, T., Stekelenburg, J. J., Eussen, M. L. J. M., & Vroomen, J. (2019). Electrophysiological alterations in motor-auditory predictive coding in autism spectrum disorder. *Autism Research*, 12(4), 589-599. doi:<https://doi.org/10.1002/aur.2087>
- von Hofsten, C., & Rosander, K. (2012). Perception-action in children with ASD. *Frontiers in integrative neuroscience*, 6, 115.

- Wang, Z., Magnon, G. C., White, S. P., Greene, R. K., Vaillancourt, D. E., & Mosconi, M. W. (2015). Individuals with autism spectrum disorder show abnormalities during initial and subsequent phases of precision gripping. *Journal of neurophysiology*, 113(7), 1989-2001.
- Wechsler, D. (2008). Wechsler adult intelligence scale–Fourth Edition (WAIS–IV). *San Antonio, TX: NCS Pearson*, 22, 498.
- Wegner, D. M., Sparrow, B., & Winerman, L. (2004). Vicarious agency: experiencing control over the movements of others. *Journal of personality and social psychology*, 86(6), 838.
- Wenke, D., & Haggard, P. (2009). How voluntary actions modulate time perception. *Experimental Brain Research*, 196(3), 311-318.
- Whyatt, C., & Craig, C. (2013). Sensory-motor problems in Autism. *Front Integr Neurosci*, 7, 51. doi:10.3389/fnint.2013.00051
- Williams, D., & Happé, F. (2009). Pre-Conceptual Aspects of Self-Awareness in Autism Spectrum Disorder: The Case of Action-Monitoring. *Journal of autism and developmental disorders*, 39(2), 251-259. doi:10.1007/s10803-008-0619-x
- Wilson, R. B., Enticott, P. G., & Rinehart, N. J. (2018). Motor development and delay: advances in assessment of motor skills in autism spectrum disorders. *Current Opinion in Neurology*, 31(2), 134-139. doi:10.1097/WCO.0000000000000541
- Wolpert, D. M. (1997). Computational approaches to motor control. *Trends in cognitive sciences*, 1(6), 209-216.

Wolpert, D. M., & Ghahramani, Z. (2000). Computational principles of movement neuroscience. *nature neuroscience*, 3, 1212-1217.

Wolpert, D. M., Miall, R. C., & Kawato, M. (1998). Internal models in the cerebellum. *Trends in cognitive sciences*, 2(9), 338-347.
doi:[https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(98\)01221-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(98)01221-2)

Zalla, T., Miele, D., Leboyer, M., & Metcalfe, J. (2015). Metacognition of agency and theory of mind in adults with high functioning autism. *Consciousness and cognition*, 31, 126-138.

Zalla, T., & Sperduti, M. (2015). The sense of agency in autism spectrum disorders: a dissociation between prospective and retrospective mechanisms? *Frontiers in psychology*, 6.

CHAPITRE V

DISCUSSION GÉNÉRALE: CONTRIBUTIONS AUX SCIENCES COGNITIVES DE L'AUTISME ET IMPLICATIONS CLINIQUES

5.1 Retour sur les objectifs, les hypothèses et les principaux résultats

L'objectif principal de ce programme de recherche doctoral était d'établir une première caractérisation complète du fonctionnement autistique du SdA, une fonction cognitive à la frontière de la cognition sensorimotrice et de la cognition sociale. La concomitance de manifestations cliniques importantes dans la sphère sociale et dans la sphère sensorimotrice, ainsi que des indications préliminaires suggérant que le SdA soit altéré en autisme (Sperduti et al., 2014; Zalla et al., 2015), nous ont amené à proposer une approche alternative en cognition sociale axée sur l'action et le SdA. Nous avons également investigué si ces potentielles altérations dans le fonctionnement du SdA pouvaient constituer un phénotype cognitif intermédiaire expliquant l'existence de plus en plus reconnue de liens entre les manifestations motrices de l'autisme et les symptômes traditionnels de l'autisme (i.e. Dziuk et al., 2007), définis largement dans la sphère sociale.

Nous avons donc proposé, dans un premier temps, une recension critique de la littérature existante sur le SdA en autisme et sur les processus sensorimoteurs et cognitifs qui y sont associés (Lafleur, Soulières, & Forgeot d'Arc, 2016). Cet exercice a notamment permis de dégager les questions en suspens dans le domaine du SdA en autisme, ainsi que d'établir les hypothèses de recherche que nous avons formulées préalablement à la complétion de deux études expérimentales. Nous avons en effet élaboré une tâche psychophysique permettant de caractériser simultanément les deux niveaux du SdA, soient les niveaux implicite et explicite (Synofzik et al., 2008), et d'évaluer le processus d'intégration de trois types d'indices d'agentivité selon la récente approche de l'intégration optimale des indices d'agentivité. Nous avons ainsi réalisé une étude de validation de cette tâche auprès de la population générale afin d'en vérifier la sensibilité et afin de caractériser les processus d'intégration des indices sensorimoteurs prospectifs et rétrospectifs, ainsi que ceux des indices contextuels, chez les individus neurotypiques. L'étude principale, durant

laquelle la tâche psychophysique du SdA et des tests neuropsychologiques évaluant les manifestations motrices et sociales de l'autisme ont été administrées à un échantillon d'adultes diagnostiqués avec un TSA, nous a permis de répondre plus spécifiquement aux questions soulevées par l'article de recension critique. Nous détaillons ci-dessous la contribution de chacun des trois articles dans l'atteinte des objectifs généraux de ce programme de recherche et effectuons un retour sur les principaux résultats obtenus dans le cadre des deux études expérimentales.

5.1.1 Retour sur la recension critique de la littérature sur le sens de l'agentivité en autisme

Cette revue de la littérature a permis d'établir qu'il existait des preuves récentes que les deux niveaux du SdA présentaient des altérations en autisme, tel que mis en évidence par une abolition de l'effet de couplage d'intentionnalité pour la modalité visuelle (Sperduti et al., 2014) et une sous-utilisation des indices sensorimoteurs dans l'établissement de jugements d'agentivité (Zalla et al., 2015). Ces deux études plus récentes contrastaient avec les résultats d'études sur le monitoring de l'action, une notion apparentée au SdA, qui observaient plutôt une absence de différence entre les individus autistes et les individus neurotypiques (Grainger et al., 2014; Russell & Hill, 2001; D. Williams & Happé, 2009). Toutefois, le réexamen de l'ensemble des méthodologies employées a permis de mettre en évidence le besoin pour les paradigmes expérimentaux sur le SdA de permettre de désambiguïser les contributions relatives de différents types d'indices d'agentivité. En effet, les études sur le monitoring de l'action en autisme ne s'appuyaient pas sur les avancées théoriques récentes dans le champ du SdA, soit les approches d'intégration optimale des indices d'agentivité (Moore & Fletcher, 2012; Synofzik et al., 2013), qui postulent que le SdA possède deux niveaux et que, pour chacun d'entre eux, différentes classes d'indices sont intégrés en fonction de leur disponibilité et de leur fiabilité. Ainsi, il s'est dégagé qu'aucune étude précédente sur le SdA en autisme n'était parvenue à départager les contributions de trois catégories d'indices

d'agentivité, soient les indices sensorimoteurs prospectifs, les indices sensorimoteurs rétrospectifs et les indices contextuels. En effet, il apparaissait également que des performances similaires lors de l'établissement de jugements explicites d'agentivité pouvaient être sous-tendues par des processus d'intégration atypiques chez les personnes autistes. De plus, bien que deux études aient respectivement pointé vers des atypies dans le fonctionnement du niveau implicite et du niveau explicite du SdA, aucune étude évaluant simultanément ces deux niveaux d'agentivité n'avait été réalisée. Ainsi, cette revue de littérature a permis d'établir le besoin d'effectuer une caractérisation complète du fonctionnement du SdA en autisme selon le paradigme de l'intégration optimale des indices d'agentivité et d'explorer les liens existants entre le profil de fonctionnement autistique du SdA et des manifestations cliniques saillantes.

Cet article a également permis d'émettre une série d'hypothèses à confirmer avec le paradigme expérimental développé dans le cadre de cette thèse. D'abord, quant au fonctionnement du SdA chez la population neurotypique, nous nous attendions à ce que le niveau implicite du SdA, tel que mesuré par l'effet de couplage d'intentionnalité, soit dominé par les indices sensorimoteurs prospectifs (en accord avec Moore & Haggard, 2008), tels que la présence d'une copie efférente ou les signaux de sélection de l'action. Nous nous attendions, pour le niveau explicite, à ce que les indices sensorimoteurs rétrospectifs et les indices contextuels prennent davantage d'importance dans le processus intégratif. Enfin, selon la théorisation de Synofzik et al. (2013), nous nous attendions également à ce que le niveau explicite du SdA soit partiellement fondé sur la trace d'agentivité au niveau implicite (couplage d'intentionnalité). Ensuite, pour le fonctionnement du SdA chez les personnes autistes, nous anticipions une abolition de l'effet de couplage d'intentionnalité dans la modalité visuelle au niveau implicite expliquée par des atypies dans l'utilisation ou la formation des indices prospectifs (en accord avec Sperduti et al., 2014). Nous nous attendions, au niveau explicite, que les personnes autistes fondent leur jugement d'agentivité principalement sur les indices contextuels, en raison d'un manque de

fiabilité ou de disponibilité des indices sensorimoteurs (en accord avec Zalla et al., 2015).

5.1.2 Retour sur l'étude de validation de la tâche psychophysique sur le sens de l'agentivité

L'objectif de l'article de validation était d'abord de vérifier la sensibilité de la tâche psychophysique développée pour capter l'effet de couplage d'intentionnalité selon la méthode de reproduction d'intervalle développée par Humphreys and Buehner (2010). Ensuite, l'étude cherchait également à définir un profil de fonctionnement du SdA chez la population neurotypique, en spécifiant les processus d'intégration et de pondération de différents types d'indices d'agentivité, soient les indices sensorimoteurs prospectifs, les indices sensorimoteurs rétrospectifs et les indices contextuels. Lors de la complétion de la tâche psychophysique, les participants étaient amenés à effectuer des mouvements de pincement qui avaient des conséquences visuelles. La force appliquée sur un dynamomètre était reflétée dans la hauteur à laquelle un flash apparaissait sur un écran. La manipulation des indices sensorimoteurs rétrospectifs était assurée par une altération gradée du feedback (hauteur du flash) lors de certains essais. La manipulation des indices contextuels était effectuée par l'induction d'une croyance quant au contexte social dans lequel les mouvements étaient réalisés, c'est-à-dire quant au nombre d'agents qui pouvaient être la cause du flash.

Cette étude a permis de mettre en évidence le fait que les différents types d'indices d'agentivité sont intégrés selon des pondérations différentes aux niveaux implicite et explicite du SdA. Au niveau implicite, notre étude a permis de confirmer que les indices prospectifs, disponibles avant la réalisation du mouvement, dominent l'effet de couplage d'intentionnalité, qui a été utilisé comme marqueur à ce niveau. En effet, l'étude de validation a permis de déterminer que les indices sensorimoteurs rétrospectifs et les indices contextuels (de nature sociale), n'avaient pas d'impact sur

l'effet de couplage d'intentionnalité, alors que l'altération du feedback ou l'induction d'une croyance quant au nombre d'agents pouvant être la cause des flashes ne modifiait pas la perception temporelle des participants. En ce sens, il appert que, pour la population neurotypique, les indices prospectifs tels que la présence d'une copie efférente ou la présence de signaux liés à la sélection de l'action constituent une heuristique permettant de faire émerger un SdA implicite, et ce, peu importe la disponibilité ou la fiabilité des autres types d'indices d'agentivité. Le SdA implicite permet une reconnaissance préréflexive rapide de l'agentivité, une adaptation motrice rapide en cas d'erreur ou de changement dans l'environnement (Desmurget & Grafton, 2000) et la suppression centrale des stimuli auto-générés (Blakemore, Wolpert, & Frith, 1998). Il semble donc cohérent que ce niveau soit largement dominé par des indices sensorimoteurs prospectifs, qui sont rapidement disponibles. L'étude de validation a pu montrer également qu'au niveau explicite, les trois types d'indices d'agentivité exerçaient une influence sur les jugements d'agentivité portés par les participants neurotypiques. D'abord, des effets principaux des différentes conditions d'altération du feedback et des contextes sociaux ont été détectés, montrant que l'intégration des indices sensorimoteurs rétrospectifs et des indices contextuels se faisait de façon partiellement additive. Cependant, nous avons observé que la croyance voulant que l'on soit le seul agent à pouvoir être la cause d'une action agissait comme une heuristique lorsque les indices rétrospectifs étaient peu fiables. Finalement, nous n'avons pas identifié d'association entre les marqueurs du niveau implicite (couplage d'intentionnalité) et explicite (jugements d'agentivité) pour une action donnée. Par contraste, deux études récentes (Imaizumi & Tanno, 2019; Pyasik, Burin, & Pia, 2018) ont quant à elles identifié une association entre ces deux marqueurs du SdA. Ainsi, nous suggérons, pour désambiguïser cette question dans le cadre d'une prochaine étude, l'emploi de statistiques bayésiennes, qui permettent de confirmer l'absence ou la présence d'un phénomène.

Ainsi, l'étude de validation a constitué une contribution originale au champ du fonctionnement général du SdA. D'abord, nous avons proposé des étiquettes originales pour caractériser les mécanismes d'intégration à chaque niveau (addition, heuristique, potentialisation). Ensuite, nous avons mis en lumière les pondérations respectives de trois différentes classes d'indices au fonctionnement neurotypique du SdA, en plus de contribuer au débat théorique sur la contribution du niveau implicite au niveau implicite du SdA.

5.1.3 Retour sur l'étude principale de caractérisation du profil de fonctionnement du sens de l'agentivité en autisme

L'objectif premier de cette thèse et de l'étude principale était d'effectuer la première caractérisation complète du fonctionnement du SdA en autisme selon l'approche de l'intégration optimale des indices d'agentivité (Moore & Haggard, 2008; Synofzik et al., 2013), en investiguant simultanément les niveaux implicite et explicite. Ce faisant, nous cherchions à déterminer si les processus d'intégration des différentes classes d'indices d'agentivité présentaient des atypies et à déterminer quelle était la nature de ces atypies potentielles à chacun des niveaux du SdA. Enfin, cette étude se proposait également de vérifier les associations entre les manifestations motrices et sociales et les particularités potentielles du profil cognitif du SdA chez les personnes autistes, qui pourrait constituer un phénotype intermédiaire liant ces deux types de manifestations cliniques. Pour ce faire, la tâche psychophysique du SdA validée, ainsi que deux tests neuropsychologiques mesurant respectivement les habiletés de dextérité et de coordination manuelle, puis les habiletés de Théorie de l'Esprit, ont été administrés à un échantillon d'adultes diagnostiqués avec un TSA et à un échantillon neurotypique appariés.

Plusieurs résultats d'importance se sont dégagés de cette étude. D'abord, il s'agit de la première étude à identifier que le fonctionnement du SdA chez les personnes autistes présente des atypies concomitantes aux deux niveaux. En effet, aucune étude

n'avait auparavant réalisé, chez les personnes autistes, une investigation du fonctionnement des niveaux implicite et explicite de façon simultanée, pour une action donnée. L'utilisation de l'approche de l'intégration optimale des indices d'agentivité lors de l'élaboration de la tâche psychophysique a notamment permis une meilleure sensibilité pour détecter ces atypies par rapport à des études précédentes portant sur le SdA et le monitoring de l'action, qui mesuraient des jugements d'agentivité explicites sans toutefois permettre de départager les contributions relatives de différentes classes d'indices (N. David et al., 2008; Grainger et al., 2014; Russell & Hill, 2001; D. Williams & Happé, 2009). Ensuite, cette étude a permis de confirmer l'abolition de l'effet de couplage d'intentionnalité pour des actions avec des conséquences dans la modalité visuelle chez les personnes autistes, en accord avec les travaux de Sperduti et al. (2014). Le couplage d'intentionnalité est un marqueur implicite du SdA qui est, dans la population neurotypique, principalement déterminé par l'influence des indices sensorimoteurs prospectifs, tel que l'a confirmé notre étude de validation de la tâche psychophysique. Les résultats de l'étude principale permettent de préciser que les indices sensorimoteurs rétrospectifs et les indices contextuels n'exercent pas d'influence sur la force du couplage observé pour les conséquences des actions auto-générées chez les personnes autistes, indiquant que le couplage d'intentionnalité en autisme n'émerge pas non plus de classes d'indices alternatives. Ainsi, l'abolition de l'effet de couplage d'intentionnalité apparaît naître de l'indisponibilité des indices prospectifs tels que les modèles internes de l'action (présence d'une copie efférente) ou les signaux de sélection de l'action. Cette interprétation semble coïncider avec la reconnaissance croissante d'une altération de la formation des modèles internes de l'action (Mostofsky & Ewen, 2011) et du contrôle moteur prospectif (Mosconi et al., 2015; Z. Wang et al., 2015) en autisme. En somme, les mouvements auto-générés ayant des conséquences visuelles chez les personnes autistes ne présentent pas la signature unique qu'apporte l'effet de couplage d'intentionnalité chez les personnes neurotypiques. L'absence de cette signature pourrait être à la source de conséquences fonctionnelles importantes, car

l'émergence d'un SdA implicite participe à plusieurs fonctions fondamentales dans le contrôle de l'action, telles que la correction précoce des erreurs de mouvements et les ajustements aux changements dans l'environnement (Desmurget & Grafton, 2000), ainsi que la réduction du bruit occasionnée par les actions auto-générées dans le système sensoriel (Blakemore, Wolpert, & Frith, 2000). Cependant, nous devons préciser que le paradigme expérimental employé ne mesurait qu'un seul marqueur du SdA implicite, soit le couplage d'intentionnalité, et que ce marqueur se fonde essentiellement sur les indices prospectifs, dont l'intégration apparaît altérée en autisme. Nous ne pouvons pas exclure que, chez les personnes autistes, les mouvements auto-générés, ainsi que leurs conséquences visuelles dans l'environnement, acquièrent une signature unique via d'autres marqueurs du SdA implicite, tels que l'atténuation sensorielle (Blakemore et al., 1998). Ce marqueur courant du SdA est reconnu pour refléter le processus de comparaison du feedback sensoriel et des prédictions sensorielles contenues dans la copie efférente et constitue donc un marqueur implicite articulé autour d'information sensorimotrice rétrospective. Quelques études ont identifié que ce phénomène est préservé chez les personnes autistes dans la modalité auditive (Blakemore et al., 2006; Finnemann, Plaisted-Grant, Moore, Teufel, & Fletcher, 2020). Toutefois, si la formation-même de la copie efférente est altérée en autisme pour la modalité visuelle, il serait attendu que ce marqueur soit également altéré lorsqu'évalué pour des actions avec des conséquences visuelles plutôt qu'auditives. Si, au contraire, ce marqueur affiche un fonctionnement équivalent à celui des personnes neurotypiques, il faudrait plutôt conclure que c'est une altération du recrutement --plutôt que de la disponibilité en tant que tel-- de la copie efférente qui est à la source de l'abolition du couplage d'intentionnalité, car l'atténuation sensorielle presuppose la présence d'une copie efférente fiable à des fins de comparaison. Cette question sera d'intérêt pour la recherche future car, à notre connaissance, aucune étude n'a été réalisée pour évaluer l'atténuation sensorielle en autisme dans la modalité visuelle, pourtant incontournable pour investiguer la cognition motrice.

La caractérisation du niveau explicite du SdA en autisme a permis de confirmer les résultats de Zalla et al. (2015), qui offraient une indication préliminaire que les jugements d'agentivité en autisme se distinguaient par une sous-utilisation des indices sensorimoteurs. En effet, nos résultats confirment que les personnes autistes présentent deux fois plus de chance de s'auto-attribuer l'agentivité d'un stimulus visuel dans une situation où il existe une large disparité entre sa position prévisible et sa position actuelle et où cette disparité est le seul indice fiable permettant d'inférer la cause de l'action. Pour les personnes neurotypiques, cette large disparité constitue plutôt un indice fort, même diagnostique, d'agentivité externe. Dans l'expérience de Zalla et al. (2015), les indices contextuels étaient manipulés en offrant un feedback variable sur la performance, alors qu'un son signifiant le succès dans l'atteinte d'une cible était déployé selon diverses conditions, offrant parfois un feedback cohérent avec la performance et parfois un feedback incohérent, par exemple un succès « magique » malgré l'échec réel de l'atteinte de la cible. La fiabilité des indices sensorimoteurs était réduite par l'introduction d'une distorsion spatiale ou temporelle sur le feedback visuel. Ces chercheurs ont observé que les personnes autistes utilisaient les indices contextuels (feedback sur la performance), indices disponibles seulement après la complétion de l'action, de manière équivalente aux participants neurotypiques. Zalla and Sperduti (2015) se sont servis de ces résultats pour introduire l'hypothèse voulant que les mécanismes prospectifs du SdA soient altérés, alors que les mécanismes rétrospectifs se voudraient préservés. Nous interprétons différemment leurs résultats, puisque les jugements d'agentivité des personnes autistes se fondaient moins que ceux des personnes neurotypiques sur les indices sensorimoteurs. Nous jugeons que les indices sensorimoteurs offerts aux participants dans leur étude (feedback visuel intact ou altéré de la position du curseur de la souris) étaient également rétrospectifs de nature. Les résultats de notre étude principale soutiennent également une intégration altérée des indices sensorimoteurs rétrospectifs. En effet, dans la tâche psychophysique, dans le contexte où la croyance d'être seul à pouvoir être la cause de l'action ne pouvait pas informer le SdA,

diminuer la fiabilité des indices sensorimoteurs rétrospectifs n'entraînait pas une diminution des auto-attributions d'agentivité équivalente à celle retrouvée chez les participants neurotypiques.

Notre étude principale était également conceptualisée pour permettre l'obtention simultanée d'une mesure implicite et explicite du SdA pour une action donnée, ce qui constitue un défi méthodologique dans le domaine et ce qui n'avait pas encore été réalisé dans l'étude du fonctionnement des personnes autistes. Ainsi, nous avons pu confirmer que, dans la population typique, la force de l'effet de couplage d'intentionnalité (la sous-estimation de l'intervalle action-conséquence) était associée à de plus grandes probabilités de s'auto-attribuer la cause d'une conséquence visuelle de l'action. Ce résultat est conforme aux prévisions à la théorie de Synofzik et al. (2013) qui prévoyait que l'enregistrement du SdA au niveau implicite constituait un indice d'agentivité pouvant contribuer à l'établissement d'un JdA au niveau explicite. En contraste à ces résultats chez notre échantillon neurotypique, l'association entre mesure implicite et mesure explicite pour le groupe de personnes autistes signalait plutôt un lien positif entre les estimations temporelles et les probabilités de répondre « moi » au niveau explicite. Ainsi, moins l'effet de couplage d'intentionnalité était présent, plus les probabilités de s'auto-attribuer la cause du flash vert étaient grande pour ce groupe. Ce résultat semblait incompatible avec l'abolition générale de l'effet de couplage d'intentionnalité détectée lors de l'analyse des données du niveau implicite. Ainsi, nous avons effectué une sous-analyse en évaluant les différences interindividuelles au sein de chaque groupe afin de départager les participants présentant, sur une base individuelle, l'effet de couplage d'intentionnalité, une abolition de l'effet de couplage d'intentionnalité ou une surestimation des intervalles action-conséquence. Nous avons ainsi pu détecter que le groupe autiste présentait une hétérogénéité marquée en comparaison au groupe neurotypique quant aux patrons d'estimation des intervalles (les trois sous-groupes étaient également représentés en

autisme). Ainsi, nous avons suggéré comme piste future d'étudier le SdA en autisme en prenant en considération l'hétérogénéité des fonctionnements sensorimoteurs.

Les résultats des tests neuropsychologiques évaluant les habiletés motrices et les habiletés de Théorie de l'Esprit soulèvent des questions centrales pour la conceptualisation du phénotype comportemental et cognitif autistique. En effet, nous avons identifié des performances réduites chez les personnes autistes, avec une taille d'effet modérée, au test Purdue Pegboard, un test exigeant des habiletés de dextérité fine et de coordination des mains, et aux habiletés de Théorie de l'Esprit, telles que mesurées par le RMET (Baron-Cohen et al., 2001). Bien qu'une altération de la Théorie de l'Esprit comme une manifestation cardinale, même causale, de l'autisme par l'influente théorie cognitive de l'autisme proposée par Baron-Cohen et al. (1985), notre étude soutient plutôt que les difficultés de Théorie de l'Esprit ne s'avèrent pas plus saillante que les difficultés de dextérité fine et de coordination. En accord avec un nombre grandissant de travaux qui exposent la présence de difficultés motrices prévalentes et persistantes et qui appellent à inclure des altérations motrices dans les traits cardinaux de l'autisme (pour quelques exemples, voir Dziuk et al., 2007; Fournier, Hass, et al., 2010; Gowen & Hamilton, 2013; Mosconi et al., 2015; Z. Wang et al., 2015; Whyatt & Craig, 2013), nous identifions que les adultes autistes présentent des difficultés motrices significatives dans l'exécution de mouvements des membres supérieurs. Cette observation est importante cliniquement, car la présence de difficultés de coordination des deux mains et des doigts lors de la réalisation de gestes de précision guidés visuellement est susceptible d'apporter des limitations fonctionnelles. Notamment, il a été montré que les enfants autistes éprouvent des difficultés de calligraphie (Fuentes, Mostofsky, & Bastian, 2009) et une atteinte de la dextérité fine et de la coordination pourrait vraisemblablement sous-tendre ces difficultés qui posent défi au quotidien.

De plus, nous avons détecté une association dans l'ensemble de notre échantillon entre les scores au Purdue Pegboard et au RMET. Ce résultat suggère qu'il est tout à fait pertinent de considérer les habiletés motrices et les habiletés en cognition sociale comme pouvant potentiellement partager des bases cognitives interdépendantes. Cependant, afin de mieux caractériser le lien potentiel entre les difficultés cliniques rencontrées par les personnes autistes dans la sphère sociale et les difficultés de coordination et de dextérité mises en évidence, nous suggérons de réexplorer cette relation à l'aide de tests qui reflètent plus fidèlement les atteintes sociales observées en clinique, notamment à l'aide de questionnaires cliniques sur le fonctionnement social comme l'Échelle de réciprocité sociale (Constantino, 2013) ou alors par le biais de tâches de mentalisation plus écologiques, comme un jeu contrôlé axé sur les aspects de réciprocité (Forgeot d'Arc et al., 2020). Plusieurs études sont parvenues à montrer l'existence d'un lien entre des atteintes praxiques et les symptômes autistiques, largement définis dans la sphère sociale (Dziuk et al., 2007; Kaur et al., 2018).

- Retour sur les résultats de l'association entre SdA et mesures cliniques
 - Associations
 - Notion de phénotype intermédiaire

Nous avions également postulé que les atypies du SdA identifiées à l'aide de notre tâche psychophysique pourraient constituer un phénotype cognitif intermédiaire expliquant l'association entre les difficultés motrices et les manifestations de la sphère socio-communicative. Pour explorer cette question, nous avons investigué les corrélations existantes entre les scores aux deux tests neuropsychologiques et les indicateurs d'atypie du SdA au niveau implicite et explicite, soit la force du couplage d'intentionnalité et la propension à s'auto-attribuer l'agentivité du flash lorsque le feedback visuel était largement altéré. Nous sommes en effet parvenus à montrer qu'il

existe une association franche entre la dextérité fine et la coordination manuelle et l'indicateur explicite d'altération du SdA. Ce résultat suggère que, chez les personnes autistes, les difficultés comportementales dans la sphère de la motricité sont accompagnées d'altérations dans les processus cognitifs de contrôle et de conscience du mouvement au niveau subjectif et méta-réflexif. Cela soutient une conceptualisation des manifestations sensorimotrices de l'autisme non pas comme des manifestations accessoires et secondaires, mais comme des caractéristiques signifiantes ayant un impact mesurable dans les comportements et la subjectivité des personnes autistes. D'ailleurs, une rare étude qualitative sur l'expérience subjective des personnes autistes relativement aux phénomènes sensoriels et au mouvement laisse entrevoir que des difficultés à contrôler, à exécuter et à combiner des mouvements est un élément saillant de l'expérience consciente de certaines personnes autistes (Robledo, Donnellan, & Strandt-Conroy, 2012). Des difficultés de coordination des membres étaient fréquemment rapportées dans les entrevues réalisées et ces difficultés étaient jugées comme frustrantes par les participants. Certaines personnes autistes rapportent également des expériences sensorielles étranges qu'elles attribuent à des causes surnaturelles (Visuri, 2020). Nous avons également signalé la présence de tendances statistiques pertinentes suggérant que les habiletés de dextérité/coordination et les habiletés de Théorie de l'Esprit étaient également associées, quoique légèrement, aux indicateurs implicites et explicites d'altérations du SdA. Bien que cette tendance observée devra être validée avec des études portant sur des échantillons de plus grande taille, ces résultats sont tout à fait compatibles avec l'hypothèse selon laquelle les altérations du SdA pourraient constituer un phénotype intermédiaire liant les manifestations motrices et sociales de l'autisme. Notre étude principale confirme donc la présence d'altérations dans les mécanismes du SdA des personnes autistes, un construit situé dans l'architecture sensorimotrice, qui est centrale à la cognition humaine (National Institute of Mental Health, 2019). Nous fournissons également des indications préliminaires que ces particularités cognitives possèdent un intérêt pour la compréhension du

développement conjoint de difficultés motrices et socio-communicatives rencontrées par les personnes autistes.

5.2 Contribution de l'approche en cognition sociale axée sur l'action et le sens de l'agentivité pour les sciences cognitives de l'autisme et la compréhension du phénotype autistique

Le développement de comportements adaptifs chez un enfant, qui se construit en tant qu'agent dans un environnement, est basé sur l'acquisition d'habiletés à anticiper le flot des événements dans le monde, ainsi que le déroulement de ses propres actions. L'organisation d'un système de contrôle et de conscience de l'action est le fondement du développement cognitif humain (von Hofsten, 2009). Une action constitue une série de mouvements qui est initiée par un agent motivé, qui est définie par un but et qui est guidée par de l'information (Von Hofsten, 2004). La formation du système de l'action permet notamment la reconnaissance de la différence entre le soi et l'autre. Dès les premières semaines suivant leur naissance, les nouveau-nés affichent une majorité de comportements prospectifs et flexibles dirigés vers des buts. Par exemple, lorsque l'on touche la joue d'un nouveau-né, ce dernier tourne la tête vers le point de contact en ouvrant la bouche afin d'être nourri. Ce geste est nommé, à tort, « le réflexe des points cardinaux », mais ne constitue pas un réflexe au même titre que le réflexe rotulien. En effet, ce mouvement constitue plutôt une action flexible, orientée vers un but et guidée par une cible perceptuelle. De plus, il n'est pas déclenché lorsque le bébé se touche lui-même la joue (Rochat & Hespos, 1997), suggérant que les nouveau-nés affichent dès leur naissance une forme de différentiation soi-autre fondée dans leur système de l'action. Une grande partie du répertoire des comportements des jeunes enfants est constitué d'actions exploratoires, comme sucer son doigt ou tenter d'agripper un objet avant même d'en être capable, permettant la maturation d'un répertoire grandissant d'actions associant commandes motrices et mouvements, vision et proprioception (von Hofsten, 2009). La perception est en ce

sens quelque chose que l'agent fait, et non pas quelque chose qui lui arrive (Bridgeman & Tseng, 2011). Le développement du système de l'action inclut donc des éléments de perception, de cognition et de motivation incarnés et guide l'agent dans son exploration et son interaction avec l'environnement.

Nous avons proposé avec ce programme de recherche doctoral de caractériser le SdA en autisme afin de promouvoir une approche en cognition sociale axée sur l'action et les processus cognitifs sensorimoteurs. Le SdA est une des fonctions cognitives de l'architecture sensorimotrice qui reflète la conscience et le traitement cognitif de l'action et de ses conséquences perceptuelles. L'étude du SdA permet de comprendre comment l'agent utilise l'information, provenant de son propre système, mais également celle provenant des autres agents ou du contexte environnemental via le sens visuel, pour guider son action dans l'interaction sociale. Les altérations du SdA mises en évidence dans l'étude principale démontrent que la conscience de l'action en autisme est atypique et nous réexplorons ci-dessous les impacts que cela peut avoir dans la caractérisation du profil cognitif autistique pour l'environnement social et dans l'expérience subjective des personnes autistes. Mais d'abord, nous revenons sur les impacts phénoménologiques des altérations du SdA dans d'autres conditions neuropsychiatriques pour lesquelles elles sont davantage étudiées, c'est-à-dire la schizophrénie et le trouble obsessionnel-compulsif, afin de mettre en lumière comment les altérations de la conscience de l'action peuvent mener à des manifestations cliniques observables. Les différences dans le fonctionnement du SdA entre ces conditions et l'autisme peuvent éclairer les différences observées dans les phénotypes de ces conditions respectives.

5.2.1 L'altération du sens de l'agentivité en schizophrénie et dans le trouble obsessionnel-compulsif : différentes atypies, différentes conséquences cliniques

Les impacts cliniques d'une atteinte du SdA ont été investigués principalement dans l'étude de la schizophrénie, probablement en raison du rôle plus saillant que jouent les attributions soi-autre dans la description des symptômes positifs comme les hallucinations. En ce sens, la schizophrénie est souvent perçue comme un trouble du développement du SdA. En effet, le fonctionnement du SdA en schizophrénie présente des altérations aux niveaux implicite et explicite, mais ces altérations se distinguent de celles mises en évidence en autisme dans la présente thèse. D'abord, pour le niveau implicite, on observe chez les personnes schizophrènes un renforcement de l'effet de couplage d'intentionnalité pour des actions avec des conséquences visuelles (P. Haggard, Martin, Taylor-Clarke, Jeannerod, & Franck, 2003). Lorsque les effets d'une action sont prévisibles, les personnes neurotypiques font l'expérience d'une attraction subjective du temps perçu de l'occurrence de l'action vers le temps prévu d'occurrence de sa conséquence, et ce, même lorsque la conséquence n'est exceptionnellement pas présentée (Moore & Haggard, 2008). Ceci montre la prédominance des indices prospectifs dans l'émergence de l'effet. Or, l'effet de couplage d'intentionnalité n'émerge que lorsque la conséquence visuelle du mouvement est présentée chez les personnes schizophrènes, et cette tendance est positivement corrélée à la sévérité des symptômes positifs (Voss et al., 2010). L'imprécision des prédictions internes des conséquences de l'action est à la source d'une sur-dépendance aux signaux externes comme les indices rétrospectifs visuels et les indices contextuels dans le fonctionnement de leur SdA (Synofzik, Thier, Leube, Schlotterbeck, & Lindner, 2009). De plus, pour les mouvements ayant des conséquences proprioceptives, les personnes schizophrènes éprouvent une réduction de l'intensité de l'atténuation sensorielle, suggérant un SdA réduit pour les actions ayant des conséquences proprioceptives (Shergill, Samson, Bays, Frith, & Wolpert, 2005). L'atténuation sensorielle pour les actions aux conséquences proprioceptives

apparaît au contraire préservée en autisme (Blakemore et al., 2006). Pour en revenir à la schizophrénie, les délires d'influence sont ainsi interprétés comme une tendance à la sur-attribution des événements externes à soi découlant de l'influence excessive des indices d'agentivité externes (Synofzik & Voss, 2010), comme les indices sensorimoteurs rétrospectifs visuels et les indices contextuels. À l'opposé, les hallucinations sont expliquées par une difficulté à utiliser les signaux internes pour s'auto-attribuer l'agentivité d'événements sensoriels auto-générés (Synofzik & Voss, 2010), comme lorsque l'on parle ou lorsque l'on effectue des saccades oculaires. Cette interprétation semble cohérente avec la réduction de l'atténuation sensorielle, qui réduit le bruit dans le système sensoriel. Il est également très éclairant de constater que les différents sous-types cliniques en schizophrénie sont associés à différents profils de fonctionnement du SdA. Ainsi, dans la schizophrénie de type paranoïde, où les délires d'influence sont prédominants, les auto-attributions pour des événements visuels externes sont plus élevées que chez la population générale, alors que l'inverse est observé pour la schizophrénie avec une prédominance de symptômes négatifs (Maeda et al., 2013), où l'avolition, la passivité et le sentiment de manque de contrôle sont davantage observés.

La conceptualisation clinique du trouble obsessionnel-compulsif qui inclut des aspects du SdA demeure moins élaborée que celle proposée en schizophrénie. Toutefois, le SdA constitue une avenue intéressante pour expliquer le phénomène des comportements compulsifs, qui ne peut être entièrement expliqué par l'évitement des pensées obsessionnelles. En effet, le sentiment d'incomplétude est largement rapporté par les personnes avec un trouble obsessionnel-compulsif comme étant le facteur motivant leurs comportements compulsifs et il a été montré que les déficits sensorimoteurs à l'enfance prédisent l'apparition du trouble à l'âge adulte (Szalai, 2019). Ainsi, Szalai (2019) considère que la phénoménologie du trouble obsessionnel-compulsif se distingue de celle de la schizophrénie en ce qu'elle constitue une altération d'un mécanisme de comparateur de plus haut niveau qui

compare l'objectif d'une action et son résultat, plutôt que le mécanisme plus sensorimoteur qui compare les prédictions sensorielles avec le feedback actuel. La comparaison entre le but d'une action et son résultat est un mécanisme essentiel au raffinement du modèle inverse de l'action, qui représente les programmes moteurs les plus à même de permettre l'atteinte d'un but.

5.2.2 Altération de la conscience de l'action : ce que nous apprend le sens de l'agentivité sur la phénoménologie et le phénotype autistiques

Le SdA implicite facilite le contrôle et la correction rapide des mouvements (Desmurget & Grafton, 2000), ainsi que la réduction du bruit dans le système sensoriel en supprimant l'input des actions auto-générées (Blakemore et al., 1998). Il joue également un rôle dans l'anticipation des conséquences de ses propres mouvements, dans l'apprentissage procédural et le raffinement des modèles internes de l'action. Nous avons montré que le SdA implicite des personnes autistes présente des altérations. Ainsi, le SdA implicite des personnes autistes est caractérisé par l'abolition de l'effet de couplage d'intentionnalité dans la modalité visuelle découlant d'une difficulté à employer les signaux prospectifs visuels comme la copie efférente de l'action. Cette sous-utilisation des signaux visuels est associée à une surdépendance aux signaux proprioceptifs (Haswell et al., 2009). Ces altérations du SdA implicite se distinguent de celles rencontrées en schizophrénie, où l'effet de couplage d'intentionnalité est renforcé dans la modalité visuelle, et sont en conséquence susceptibles d'être accompagnés d'une phénoménologie différente. De plus, les personnes autistes ne semblent pas utiliser les signaux visuels externes comme signaux alternatifs informant leur SdA implicite, tel que c'est le cas en schizophrénie. Ainsi, les altérations du SdA implicite en autisme semblent en effet avoir des impacts fonctionnels et subjectifs qui sont cohérents avec leur nature. Nous avons montré dans l'étude principale de ce programme de recherche que l'abolition de l'effet de couplage d'intentionnalité montrait une tendance statistique indiquant une association plausible avec les difficultés de coordination manuelle et de dextérité. Ces difficultés

peuvent avoir des impacts fonctionnels importants, par exemple en contribuant aux difficultés de calligraphie rapportées en autisme (Fuentes et al., 2009). Des difficultés dans le contrôle postural constituent un autre impact plausible de la sous-utilisation des indices prospectifs dans le SdA en autisme. En effet, le contrôle postural se fonde sur l'anticipation des changements dans la position du corps et de la tête dans l'environnement afin de prédire l'effet de la gravité sur ceux-ci (von Hofsten & Rosander, 2012). Le contrôle postural statique et dynamique est réduit chez les enfants autistes (Fournier, Kimberg, et al., 2010). Chez les adultes autistes, on constate généralement un retard dans le développement du contrôle postural et un niveau maximal réduit (Minschew, Sung, Jones, & Furman, 2004). En cohérence avec la sur-dépendance aux signaux proprioceptifs dans la formation des modèles internes, les adultes autistes utilisent davantage les informations proprioceptives que visuelles dans leur contrôle postural (Morris et al., 2015). Toutefois, l'association entre les altérations du SdA implicite et les atteintes du contrôle postural demeurent à investiguer expérimentalement.

Comme le SdA implicite joue un rôle dans l'anticipation et la correction rapide des conséquences des actions, son altération est susceptible d'être accompagnée de difficultés praxiques. La dyspraxie idéomotrice se définit comme une atteinte dans la capacité à effectuer des gestes entraînés et des difficultés à reconnaître les gestes entraînés effectués par les autres (Rothi & Heilman, 2014). Elle implique également des difficultés à effectuer des séquences complexes d'actions, par exemple lorsque l'on enfile ses vêtements ou lorsque l'on utilise un outil. L'anticipation des conséquences d'une action est une habileté essentielle dans le contrôle des praxies. Or, l'enchaînement d'actions constitue une difficulté pour les enfants autistes (von Hofsten & Rosander, 2012). Les enfants autistes semblent éprouver des difficultés à préparer une action en se basant sur l'enclenchement d'une action préalable. Par exemple, contrairement aux enfants neurotypiques, lorsque les enfants autistes agrippent un aliment pour le manger, les muscles de leur bouche ne s'activent pas lors

de l'initiation du mouvement de préhension (Cattaneo et al., 2007). Les difficultés à enchaîner les actions peuvent avoir des impacts sur le fonctionnement social, notamment parce que plusieurs gestes socio-communicatifs sont des praxies (expression faciales, langage non-verbal comme les salutations, les marques de politesse et de réciprocité, etc.). Encore une fois, l'association entre l'abolition du couplage d'intentionnalité et les difficultés praxiques, quoique cohérente et probable, demeure à être confirmée expérimentalement.

Le niveau explicite du SdA est plutôt une attribution causale consciente, qui permet de prendre en compte de façon flexible les connaissances de l'environnement et du contexte. Ce niveau est le fruit d'un raisonnement qui permet de prendre une décision quant à la source d'une action et de ces conséquences même lorsque l'agentivité est ambiguë ou indirecte (Synofzik & Voss, 2010), par exemple lorsque les conséquences d'une action sont difficiles à prédire ou que les actions entraînent une série de conséquences. Au niveau explicite, les personnes autistes affichent une sous-utilisation des indices sensorimoteurs visuels, alors qu'elles s'auto-attribuent davantage les conséquences d'une action malgré une disparité au comparateur. Cette tendance à l'auto-attribution des événements visuels discordants pourrait s'expliquer dans la tâche psychophysique que nous avons développée par le fait que le feedback proprioceptif pour l'action était disponible. Il est plausible que les réafférences proprioceptives soient prédominantes dans l'établissement du SdA, même explicite, chez les personnes autistes. Cette difficulté à employer le feedback visuel pour établir des jugements d'agentivité conscients pourrait tout de même entraîner des difficultés avec l'apprentissage moteur explicite. Ce type d'apprentissage est employé lorsque l'on apprend une nouvelle action ou que l'on tente consciemment de corriger un mouvement en modifiant le programme moteur normalement employé. D'ailleurs, nous avons identifié une association franche entre la difficulté à employer les indices sensorimoteurs rétrospectifs et les difficultés de coordination et de dextérité manuelles.

La présence d'une tendance à se désigner comme la cause d'événements visuels discordants avec leurs actions a été soulevée comme une cause probable des délires d'influence dans l'étude de la schizophrénie. L'observation d'une tendance semblable en autisme exige que l'on se questionne sur la présentation clinique qui pourrait découler d'un tel fonctionnement du SdA. Si les hallucinations ou les explications délirantes d'événements sensoriels ne sont pas considérées comme des manifestations de l'autisme, il existe tout de même des indications que les personnes autistes expérimentent un taux élevé d'expériences sensorielles inhabituelles. Dans une étude employant l'Échelle des perceptions anormales de Cardiff (Cardiff Anomalous Perceptions Scale Bell, Halligan, & Ellis, 2005; traduction), une échelle auto-rapportée évaluant différentes expériences sensorielles inhabituelles dans différents domaines, ainsi que leur intensité, leur fréquence et la détresse associée, Milne, Dickinson, and Smith (2017) ont observé que 93 % des personnes autistes rapportaient davantage d'expériences inhabituelles que leur échantillon neurotypique. Les personnes autistes rapportaient également un niveau similaire d'intensité, de fréquence et de détresse associée à ces expériences que celui rapporté par un échantillon de personnes hospitalisées pour une psychose aigue (Bell et al., 2005). Lorsque l'on considère les 8 expériences inhabituelles les plus rapportées par les personnes autistes, on constate qu'elles sont contenues dans les domaines des expériences sensorielles à intensité accrue, des expériences sensorielles non-partagées et des expériences sensorielles de source inexpliquée. En ce sens, dans cette étude, 73 % des autistes rapportaient entendre des sons que rien ne pouvait expliquer contre 27 % des neurotypiques, 67 % des autistes rapportaient ressentir parfois que quelqu'un les touchait alors qu'ils étaient seuls contre 7 % des neurotypiques, 36 % rapportaient plutôt entendre des voix qui disent des mots ou des phrases alors que personne n'est autour contre 3 % des neurotypiques. Ces résultats pourraient toutefois également être influencés par une interprétation différente des questionnaires ou par les symptômes d'hypersensibilité sensorielle chez les personnes autistes. Toutefois, les personnes autistes semblent aussi plus à même de rapporter des expériences sensorielles qu'elles

attribuent à des causes surnaturelles (Visuri, 2020). En somme, ces études signalent tout de même que les expériences sensorielles inhabituelles et les expériences subjectives d'agentivité altérées pourraient être sous-estimées dans la phénoménologie de l'autisme. Pour conclure, si nous avons montré dans la présente thèse que les attributions causales d'agentivité présentent des atypies en autisme, il demeure à déterminer si ces atypies pourraient être reliées aux expériences sensorielles et aux expériences subjectives d'agentivité inhabituelles qui sont rapportées par certaines personnes autistes.

5.2.3 Comprendre les actions des autres : raisonnement métacognitif ou projection dans son propre système de l'action?

Traditionnellement, la compréhension des actions d'autres agents a été conçue comme impliquant la capacité de raisonner consciemment sur le sens des actions des autres et leurs intentions. Cette conception, qui est notamment portée par l'hypothèse de l'altération de la Théorie de l'Esprit en autisme (Baron-Cohen et al., 1985), discutée en détail dans la section 1.1.4.1, postule que les actions des autres sont comprises par des inférences métacognitives qui impliquent un savoir déclaratif (Gallagher & Varga, 2015). Cette hypothèse a été raffinée pour faire face aux critiques jugeant, sur la base de données expérimentales, que des déficits des habiletés de Théorie de l'Esprit n'étaient pas universels en autisme et ne persistaient pas nécessairement à l'âge adulte. Cette approche présuppose également que les habiletés de Théorie de l'Esprit se fondent sur des modules précurseurs innés, qui permettent aux enfants de naître avec une résonnance naturelle à la compréhension des intentions des autres, et cette approche peut donc être décrite comme proposant une « modularité nativiste » (Russell, 1996).

Plusieurs auteurs proposent donc de s'éloigner de cette vision métacognitive pour davantage mettre en avant-plan le rôle du système sensorimoteur dans la compréhension des actions des autres. Ainsi, il a été suggéré que la compréhension

des actions des autres soit fondée dans l'expérience motrice de l'enfant durant son développement et que les enfants comprennent les actions des autres en les projetant dans leur propre répertoire moteur (von Hofsten, 2009). Cette vision est appuyée par une expérience de Kochukhova and Gredebäck (2010) qui suggère que les jeunes enfants de 6 mois sont en mesure d'anticiper le but d'une action faisant partie de leur répertoire, mais pas ceux des actions qui n'en font pas encore partie. En effet, les enfants de 6 mois sont en mesure d'agripper un objet pour le porter à leur bouche, mais pas pour le déplacer. Ainsi, les enfants de 6 mois inclus dans cette expérience fixaient par anticipation la bouche d'un expérimentateur qui agrippait un objet, mais pas la cible d'un expérimentateur qui souhaitait déplacer un objet. Les enfants neurotypiques présentent également une activation anticipée des muscles de la bouche en regardant un expérimentateur agripper un aliment pour le porter à leur bouche, mais les enfants autistes ne présent pas cette activité anticipatoire (Cattaneo et al., 2007). Il a d'ailleurs été proposé que la difficulté des personnes autistes à comprendre les intentions des autres pourrait découler de leur répertoire atypique de mouvements, qui permettrait une moins bonne reconnaissance des intentions des personnes ayant un répertoire de mouvements neurotypiques (Cook, 2016). Ainsi, les personnes autistes éprouveraient davantage de facilité à reconnaître les intentions d'autres personnes autistes qui présenteraient des atypies de mouvements similaires. Les personnes neurotypiques éprouveraient également de la difficulté à reconnaître les intentions des personnes autistes puisque leurs mouvements ne feraient pas écho à leur propre répertoire moteur. Cette conception de l'action des autres étant comprise par une projection dans le système moteur d'un individu peut être définie comme une théorie de « simulation » en cognition sociale (Gallagher & Varga, 2015).

Sur le plan neuropsychologique, les théories de simulation ont été propulsées par la découverte chez les macaques des neurones miroirs (di Pellegrino, Fadiga, Fogassi, Gallese, & Rizzolatti, 1992), des neurones du cortex préfrontal qui déchargent lors de l'exécution, mais aussi lors de l'observation, d'un mouvement donné. Chez les

humains, les études en imagerie ont montré que les aires qui comprennent des neurones miroirs et forment le système de neurones miroirs sont constituées du gyrus frontal postéro-inférieur, le cortex pré moteur ventral qui lui est adjacent et la partie rostrale du lobule pariétal inférieur (Iacoboni & Dapretto, 2006). Ainsi, ce système de neurones miroirs constituerait une unité de couplage naturelle entre perception et action, qui est modulée par d'autres systèmes cognitifs (Gallese, Rochat, & Berchio, 2013). Plusieurs chercheurs ont suggéré qu'une altération du système des neurones miroirs seraient à la source des difficultés autistiques dans l'imitation et dans la communication (Gallese, 2006; Iacoboni & Dapretto, 2006; Ramachandran & Oberman, 2006).

5.2.4 L'hypothèse de l'altération du système des neurones miroirs en autisme : soutien, critiques et alternatives

L'hypothèse de l'altération du système des neurones miroirs en autisme obtient du soutien expérimental d'études employant différentes techniques d'imagerie cérébrale. Un des marqueurs les plus utilisés de l'activité du système des neurones miroirs est la suppression du rythme mu dans le cortex sensorimoteur lors de l'observation et la production d'actions, qui a été identifiée par Muthukumaraswamy, Johnson, and McNair (2004) à l'aide de l'électroencéphalographie. Ainsi, cette suppression du rythme mu a été évaluée comme présente chez les individus autistes durant la production d'une action, mais pas durant son observation (Oberman et al., 2005). D'autres études ont également détecté une altération de l'activation du système des neurones miroirs chez les personnes autistes lors de l'imitation et l'observation d'expressions faciales (Dapretto et al., 2006), lors de l'imitation de mouvements des avant-bras (J. H. G. Williams et al., 2006) et lors de l'observation de vidéos de mouvements des jambes (Martineau, Cochin, Magne, & Barthelemy, 2008). Une excitabilité réduite chez les personnes autistes du cortex moteur primaire, mesurée par les potentiels évoqués moteurs, lors de l'observation d'action des avant-bras (Enticott et al., 2012; Théoret et al., 2005) a également été avancée comme argument

soutenant l'hypothèse de l'altération du système des neurones miroirs. Or, plusieurs revues critiques (Hamilton, 2013; Southgate & de C. Hamilton, 2008; Yates & Hobson, 2020) de la littérature sur le sujet soulèvent l'existence de résultats divergents qui mettent en doute la formulation de cette hypothèse. D'abord, d'autres études concernant la suppression du rythme mu ont plutôt identifié que ce mécanisme était préservé chez les personnes autistes lors de l'observation d'une action (Fan, Decety, Yang, Liu, & Cheng, 2010), notamment lorsque l'action est exécutée par quelqu'un de familier (Oberman, Ramachandran, & Pineda, 2008). Il apparaît également que pour les actions simples avec un but clair, les personnes autistes n'affichent pas d'activation cérébrale altérée dans le réseau des neurones miroirs (Enticott et al., 2013) ni de déficit dans leurs capacités d'imitation (Hamilton, Brindley, & Frith, 2007).

Ainsi, des hypothèses alternatives à celle d'une altération globale du système des neurones miroirs en autisme ont été proposées pour expliquer la divergence des résultats au sein de ces différentes études. Hamilton (2008) a proposé que le système d'imitation contenu dans le système des neurones miroirs pourrait être constitué de deux voies dont une seule serait affectée en autisme. Le système ferait d'abord la réception de l'information kinésique visuelle. Si l'action observée est orientée vers un but, l'information emprunterait une voie d'émulation qui traiterait le sens abstrait de ce but avant de relayer l'information à un module de planification, dont la fonction serait de permettre l'exécution cette action orientée vers un but. Cette voie serait intacte chez les personnes autistes et c'est plutôt la voie du mimétisme qui présenterait des altérations. La voie du mimétisme serait une voie d'imitation automatique qui permettrait la reproduction d'un geste et qui ne traiterait pas l'information quant au but de l'action. Hamilton (2013) a également proposé une autre théorie alternative qui suggère que le système des neurones miroirs ne présente pas de déficit global, mais que c'est plutôt sa modulation top-down par le cortex préfrontal médian qui module le sens social des actions émulées qui serait altérée. Les

données expérimentales actuelles semblent compatibles avec une formulation composite de ces deux théories alternatives du système des neurones miroirs (Yates & Hobson, 2020).

Une autre explication alternative pour expliquer les résultats divergents sur le système des neurones miroirs et l'imitation en autisme est que le traitement des actions simples avec des buts directs (i.e. agripper un objet) est intact, mais que le traitement des actions enchaînées et complexes seraient altérés (Hamilton, 2013). Cette conception permet d'expliquer des habiletés préservées d'imitation d'actions simples en autisme (Hamilton et al., 2007), mais l'identification robuste de dyspraxie (Dziuk et al., 2007; Kaur et al., 2018; MacNeil & Mostofsky, 2012; Miller, Chukoskie, Zinni, Townsend, & Trauner, 2014), une manifestation clinique de l'autisme qui est évaluée par des tâches d'imitation de gestes complexes avec et sans but. Les résultats de l'étude principale de cette présente thèse semblent converger avec cette conception, car nous avons confirmé la présence de difficulté avec l'intégration des signaux prospectifs en autisme. Ces signaux jouent un rôle fondamental dans l'anticipation des conséquences des mouvements. Cette anticipation est à son tour un fondement de l'exécution et de l'interprétation des séquences de mouvements complexes.

5.3 Perspectives d'intervention basées sur le sens de l'agentivité et la conscience de l'action

L'approche proposée pour caractériser le profil cognitif autistique en mettant l'emphase sur la conscience de l'action et le SdA encourage également le développement d'interventions en autisme basées sur le mouvement et le contrôle cognitif du mouvement. Selon la perspective mise de l'avant dans la présente thèse, des interventions dans cet axe pourraient mener à l'amélioration du fonctionnement dans la sphère de la motricité et de la perception, mais également à des améliorations

dans le fonctionnement social, comme dans les habiletés nécessaires pour comprendre les actions des autres et émettre des comportements adaptatifs dans des situations sociales. Les résultats entourant le niveau implicite du SdA suggèrent que l'intégration des signaux prospectifs qui permettent l'anticipation des mouvements et des conséquences de ces mouvements, notamment lors de séquences de mouvements complexes, pourrait constituer une source d'intervention prometteuse. Les résultats concernant le niveau explicite suggèrent également que l'utilisation du feedback visuel et de l'information contextuelle pourrait être ciblée. À notre connaissance, il n'existe pas d'interventions psychologiques ou neuropsychologiques auprès de personnes ayant une condition développementale qui ciblent directement des éléments du SdA. Toutefois, plusieurs interventions ciblant la motricité ont déjà été déployées auprès d'enfants autistes.

5.3.1 Interventions ciblant l'amélioration spécifique des habiletés motrices

Une première grande catégorie d'interventions en autisme ciblant la motricité est constituée des interventions qui ciblent directement l'amélioration des habiletés motrices et du contrôle du mouvement par des activités physiques spécifiques. Ruggeri, Dancel, Johnson, and Sargent (2019) ont effectué récemment une méta-analyse incluant 41 études publiées depuis l'année 2000 discutant de l'efficacité d'interventions portant sur les habiletés motrices et des stratégies d'apprentissage moteur. D'abord, les auteurs constatent que, de toutes les études revues, aucune n'atteint le niveau 1 de rigueur méthodologique défini par l'Association américaine de la paralysie cérébrale et de la médecine développementale (*American Academy of Cerebral Palsy and Developmental Medicine*). Ils notent également que les mesures de résultats et les paramètres de motricité qui sont sélectionnés varient grandement entre les différentes études. Les auteurs notent tout de même qu'il existe des indications préliminaires que les interventions impliquant des activités physiques (i.e. soccer, gymnastique, natation), l'entraînement d'habiletés motrices (i.e. attraper des

balles), l'équitation et l'éducation physique améliorent les habiletés motrices des enfants autistes. Ils concluent toutefois qu'il existe un besoin saillant de protocoles de recherche plus rigoureux pour mesurer l'efficacité d'interventions basées sur l'activité physique en autisme. En effet, dans ce domaine, aucune étude employant des interventions manualisées, des designs adéquats (groupes contrôle adéquats, etc.) et des échantillons de taille suffisante pour rencontrer les plus hauts standards dans la recherche clinique n'a été complétée.

5.3.2 Interventions ciblant la cognition motrice et la conscience de l'action

D'autres interventions intéressantes, incluant des activités physiques, mais axées davantage sur la conscience du mouvement en contexte interpersonnel commencent à être développées pour les enfants ou les adultes autistes. Par exemple, Kaur and Bhat (2019) ont offert 8 semaines d'ateliers hebdomadaires de yoga à des jeunes autistes âgés de 5 à 13 ans. Les chercheurs ont mesuré une amélioration dans les habiletés motrices globales mesurées par le test standardisé *Bruininks-Oseretsky Test of Motor Performance – 2nd Edition* et une diminution des erreurs de praxies dans les séquences de yoga entraînées. Koehne, Behrends, Fairhurst, and Dziobek (2016) ont quant à eux développé une intervention de dix séances hebdomadaires de danse orientée vers l'imitation et la synchronisation des mouvements dans un contexte interpersonnel. Les 27 adultes ayant reçu l'intervention en danse ont montré une amélioration, significativement supérieure à celle de 24 adultes autistes recevant une intervention contrôle (basée uniquement sur l'entraînement à la coordination), des habiletés de synchronisation et d'imitation, mais également de la capacité à inférer des émotions, mesurée par le *Multifaceted Empathy Test*. Cette étude clinique soulève un intérêt particulier, car elle semble indiquer que les interventions encourageant le développement d'habiletés motrices dans un contexte interpersonnel offrent un avantage par rapport aux interventions axées sur la coordination uniquement, et ce, autant pour l'amélioration des habiletés motrices que pour l'amélioration des

habiletés de cognition sociale. Ainsi, nous estimons que les interventions basées sur le yoga et la danse sont des avenues importantes à explorer et pourraient faire l'objet de protocoles d'intervention standardisés. En effet, ce type d'intervention semble plus prometteur que les interventions axées uniquement sur l'activité physique non seulement dans sa capacité d'améliorer les habiletés motrices de production de mouvements, mais également dans sa capacité d'avoir un impact sur les mécanismes cognitifs moteurs et sociaux associés à la compréhension, la reproduction et la synchronisation de séquences de mouvements complexes. En somme, ces interventions ont le potentiel de réduire les altérations de la conscience de l'action qui sont liées aux difficultés praxiques et aux difficultés d'anticipation des conséquences du mouvement.

Les thérapies musicales constituent un autre type d'approche prometteuse pour cibler les mécanismes de contrôle et conscience de l'action. Cependant, encore aucune étude n'a évalué leur efficacité auprès de personnes autistes par le biais d'un design randomisé qui observe le plus haut niveau de rigueur méthodologique (Bhat & Srinivasan, 2013). Les interventions musicales sont logiquement reconnues pour améliorer la coordination, la dextérité fine et les habiletés praxiques (Rodriguez-Fornells et al., 2012) et pourraient contribuer également à soutenir le développement des mécanismes d'intégration multi-sensorielle, de couplage action-perception et d'anticipation des séquences de mouvements chez les personnes autistes (Bhat & Srinivasan, 2013). Il existe des interventions misant sur l'entraînement au rythme utilisées chez les enfants autistes axées sur l'amélioration des habiletés de communication (Kern & Humpal, 2015), mais ce type d'intervention pourrait aussi avoir un impact positif sur la planification motrice et l'anticipation des conséquences perceptuelles des mouvements (Hardy & LaGasse, 2013). D'autres thérapies musicales proposent des séances d'improvisation avec un thérapeute musicien dans le but de faciliter la communication verbale, non-verbale ainsi que la synchronisation entre l'enfant et le thérapeute (J. Kim, Wigram, & Gold, 2009).

5.3.3 Interventions par feedback sensorimoteur enrichi

Finalement, les interfaces enrichies de feedback sensorimoteur semblent également une avenue d'avenir pour favoriser le développement du contrôle moteur prospectif et rétrospectif et du SdA. Torres, Yanovich, and Metaxas (2013) ont créé un dispositif informatique offrant du feedback visuel enrichi sur les mouvements d'une main gantée avec des capteurs afin de favoriser l'apprentissage procédural chez les enfants autistes. Le but de leur dispositif était de favoriser l'exploration des conséquences sensorielles des mouvements et d'augmenter la fiabilité des prédictions sensorielles des mouvements des mains. Les chercheurs ont détecté que l'entraînement avec leur dispositif permettait aux enfants autistes de passer de mouvements exploratoires à des mouvements volitionnels dirigés vers un but sensoriel et mesuraient également une amélioration dans les capacités d'anticipation des conséquences sensorielles du mouvement plusieurs semaines après l'entraînement. Ce type d'interface demeure toutefois à être formalisé en protocole de traitement dont l'efficacité clinique est testable.

5.4 Limites et perspectives futures

5.4.1 Représentativité de l'échantillon et déficience intellectuelle

Un des enjeux importants dans l'investigation du fonctionnement du SdA en autisme et dans d'autres conditions développementales et cliniques se situe au niveau de la représentativité des échantillons sélectionnés dans les études. En effet, les tâches psychophysiques évaluant le fonctionnement du SdA peuvent être complexes et nécessitent l'emploi de consignes élaborées et d'une interface virtuelle parfois peu intuitive. Ainsi, la totalité des études sur le SdA en autisme (Lafleur et al., à venir; N. David et al., 2008; Sperduti et al., 2014; Zalla et al., 2015) incluant l'étude principale de la présente thèse ont été effectuées auprès d'échantillons de personnes autistes sans déficience intellectuelle. La majorité des personnes autistes ne présentent pas de

déficience intellectuelle (Postorino et al., 2016), mais nous devons souligner que nous ne sommes pas en mesure de statuer quant au fonctionnement du SdA chez le sous-groupe de personnes autistes qui présentent une déficience intellectuelle. Les résultats de notre étude sur le SdA en autisme ne peuvent donc pas être représentatifs de ce sous-groupe. Un défi de la recherche sur le SdA auprès de groupes cliniques et également auprès d'enfants est donc de simplifier les paradigmes expérimentaux pour les rendre plus intuitifs sans réduire la qualité des mesures qui en découlent.

5.4.2 La question de la spécificité des altérations et des groupes contrôles cliniques

La présente thèse a permis de mettre en évidence l'existence d'altérations en autisme dans les processus d'intégration des différents indices d'agentivité aux deux niveaux du SdA, ainsi que la présence de difficultés quant à la coordination des membres supérieurs et quant à la dextérité fine. Si l'inclusion d'un groupe contrôle neurotypique dans l'étude principale permet de mettre en évidence la présence de ces altérations ou de ces manifestations cliniques, il ne permet de statuer sur la spécificité des altérations du SdA et des difficultés de coordination/dextérité à l'autisme. Ainsi, ces particularités mises en évidence pourraient être partagées avec d'autres conditions développementales ou neuropsychiatriques et refléter davantage des défis développementaux généraux plutôt qu'un phénotype cognitif sous-tendant les manifestations cliniques spécifiques de l'autisme. Toutefois, des mesures semblables du SdA obtenues dans des études différentes peuvent être comparées et nous avons exploré comment le fonctionnement du SdA en autisme se distinguait du fonctionnement rencontré en schizophrénie ou dans le trouble obsessionnel-compulsif. De futures recherches pourraient comparer directement le fonctionnement implicite et explicite du SdA en autisme avec celui d'autres conditions développementales comme le TDAH ou le trouble développemental de la coordination. Ainsi, il serait possible de déterminer si l'abolition de l'effet de

couplage d'intentionnalité et la sous-utilisation des indices rétrospectifs dans le SdA explicite est une caractéristique spécifique du profil cognitif en autisme.

5.4.3 Limites de l'effet de couplage d'intentionnalité comme marqueur du sens de l'agentivité

Nous avons déjà souligné que le marqueur du SdA implicite employé dans notre tâche psychophysique du SdA ne constituait qu'un seul marqueur du SdA parmi d'autres. Ce marqueur est également reconnu pour émerger principalement sur les signaux sensorimoteurs prospectifs (Lafleur, Soulières, & Forgeot d'Arc, 2020; Moore & Haggard, 2008). Ainsi, il existe d'autres marqueurs comme l'atténuation sensorielle qui auraient permis d'évaluer plus spécifiquement les mécanismes d'intégration des signaux rétrospectifs dans le fonctionnement du SdA implicite en autisme. Ainsi, nous avons souligné que l'investigation de l'atténuation sensorielle dans la modalité visuelle en autisme était un élément prioritaire pour la recherche future dans ce champ.

De plus, nous avons employé, pour mesurer l'effet de couplage d'intentionnalité, la méthode de reproduction d'intervalle développée par Humphreys and Buehner (2010). Cette méthode offre certains avantages comme ceux d'être plus instinctive et de réduire les demandes attentionnelles multimodales. Cependant, contrairement à la méthode de l'horloge de Libet (par exemple, Patrick Haggard, Clark, & Kalogeras, 2002), cette méthode ne permet pas de décomposer l'effet de couplage et d'observer l'attraction subjective du temps d'occurrence du mouvement vers sa conséquence et du temps d'occurrence de la conséquence vers le mouvement.

5.4.4 Limites du *Reading the Mind in the Eyes Test* dans l'évaluation des manifestations sociales

Nous avons employé le RMET (Baron-Cohen et al., 2001), version française (Prevost et al., 2014) pour mesurer les habiletés de Théorie de l'Esprit et pour refléter les

difficultés sociales cliniquement significatives des personnes autistes. Or, cette tâche est souvent critiquée pour la valeur de son construit. Ainsi, il est souvent évoqué que le RMET est une tâche permettant l'évaluation de la reconnaissance faciale des émotion, plutôt qu'une tâche permettant d'isoler les habiletés de Théorie de l'Esprit, mieux comprise comme étant la capacité de détecter les intentions des autres agents. Ainsi, nous suggérons l'emploi de mesures alternatives de Théorie de l'Esprit, comme le test du Faux-Pas (Baron-Cohen et al., 1999) ou des jeux compétitifs mettant davantage l'emphase sur les aspects de réciprocité (Forgeot d'Arc et al., 2020). Il serait également pertinent pour la recherche à venir d'évaluer l'association entre les particularités du profil de fonctionnement du SdA en autisme et d'autres mesures peut-être plus écologiques des difficultés sociales rencontrées en autisme comme des questionnaires cliniques ou des mesures des comportements sociaux adaptatifs. Une hypothèse importante soulevée par cette thèse était que les particularités du SdA pourraient constituer un phénotype intermédiaire qui expliquerait la présence concomitante de difficultés motrices et les difficultés sociales en autisme. Le manque de sensibilité du RMET pour évaluer les difficultés sociales cliniquement significatives a limité la possibilité de répondre à cette question de recherche et cela constitue donc une limite importante à cette thèse.

CHAPITRE VI

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les difficultés socio-communicatives dans les interactions sociales réciproques constituent une caractéristique diagnostique et un trait cardinal du TSA (American Psychiatric Association, 2013). Bien qu'elles aient été historiquement moins étudiées, des difficultés motrices comme des difficultés de coordination et de contrôle de l'action, notamment de la dyspraxie (Dziuk et al., 2007), un contrôle prospectif altéré (Z. Wang et al., 2015) et des difficultés de coordination (Fournier et al., 2010), sont identifiées de façon robuste chez les personnes autistes et de plus en plus de voix s'élèvent pour que ces difficultés soient considérées comme des symptômes cardinaux de l'autisme (Bhat et al., 2011; Wilson et al., 2018). Le SdA est une fonction cognitive, faisant partie de l'architecture cognitive sensorimotrice (National Institute of Mental Health, 2019), qui permet d'identifier que l'on est la cause d'une action et de ses conséquences dans l'environnement (Patrick Haggard, 2017). Cette fonction cognitive est impliquée dans le contrôle et la conscience de l'action et son altération pourrait constituer un phénotype intermédiaire expliquant la présence concomitante de difficultés motrices et de difficultés dans la sphère socio-communicative. Bien que quelques rares études sur la question aient pu indiquer que le SdA pouvait être altéré en autisme (Sperduti et al., 2014; Zalla et al., 2015), aucune étude n'avait encore réalisé une caractérisation complète du fonctionnement du SdA en autisme en examinant simultanément le niveau implicite et explicite et les contributions des différents types d'indices d'agentivité (indices sensorimoteurs prospectifs, rétrospectifs et indices contextuels) selon l'approche théorique de l'intégration optimale des indices d'agentivité (Moore & Fletcher, 2012; Synofzik et al., 2013). L'étude principale de cette thèse est la première à montré simultanément que le fonctionnement du SdA est altéré chez les personnes autistes au niveau implicite et explicite. Nos résultats quant au niveau implicite du SdA confirment en effet l'abolition de l'effet de couplage d'intentionnalité pour les actions ayant des conséquences visuelles chez les personnes autistes. Cet effet de couplage d'intentionnalité émerge principalement, dans la population neurotypique, depuis la contribution de signaux prospectifs (Moore & Haggard, 2008) comme la copie

efférente de l'action, qui contient les prédictions des conséquences sensorielles de l'action, et des signaux de sélection de l'action (Chambon & Haggard, 2012). L'abolition de cet effet chez les participants autistes suggère donc une altération de la formation des modèles internes de l'action en autisme pour les mouvements ayant des conséquences visuelles, mais nous avons également mis en évidence l'hétérogénéité marquée dans les profils de fonctionnement du SdA implicite chez les personnes autistes. Cette observation nous amène à suggérer d'étudier de façon distincte les différents sous-groupes de personnes autistes afin de mieux comprendre la diversité des impacts cliniques et développementaux que pourraient avoir cette hétérogénéité dans les profils sensorimoteurs. Au niveau explicite, nos résultats montrent que les adultes autistes sous-utilisent par rapport aux personnes neurotypiques les indices sensorimoteurs rétrospectifs diagnostiques provenant de la disparité entre les conséquences visuelles prévisibles et réelles de l'action (suivant l'altération spatiale du feedback). De plus, nous avons montré que les personnes autistes présentent un patron opposé à celui présenté par les personnes neurotypiques quant à la contribution de l'effet de couplage d'intentionnalité au niveau explicite. Ainsi, chez les personnes autistes, moins la force de l'effet de couplage d'intentionnalité était grande, plus étaient grandes les chances de s'auto-attribuer les conséquences de l'action au niveau explicite.

L'administration du *Purdue Pegboard* et du RMET a permis de mettre en évidence la présence de difficultés de coordination et de dextérité fine pour les membres supérieurs et de Théorie de l'Esprit chez l'échantillon de personnes autistes. L'intensité des difficultés motrices est corrélée avec les altérations du SdA explicite et une tendance statistique a été observée suggérant un lien entre dextérité/coordination et Théorie de l'Esprit avec les indicateurs implicite et explicite de l'altération du SdA. Nous avons donc identifié des altérations des deux niveaux du SdA en autisme, montrant ainsi que le profil cognitif autistique comprend des atypies dans la conscience de l'action. Nous avons pu montrer que ces atypies cognitives sont

associées avec des difficultés motrices et sociales. Notre étude montre que les atypies dans le contrôle de l'action et les difficultés motrices sont des éléments significatifs du phénotype autistique dont l'étude pourrait permettre une meilleure compréhension de l'étiologie des symptômes cliniques et le développement de nouvelles approches d'intervention. Bien que cette hypothèse doit être validée à l'aide d'études comprenant des échantillons de plus grande taille, nos résultats sont compatibles avec l'hypothèse que le SdA constitue un phénotype intermédiaire liant les manifestations cliniques motrices et sociales.

ANNEXE A

AUTRES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS DURANT LE DOCTORAT

Articles de vulgarisation

Lafleur, A. (2016). Interactions sociales et sens de l'agentivité. *Sur le spectre : magazine du groupe de recherche en neurosciences de l'autisme de Montréal*. 2. 10-11.

Communications par affiche

Lafleur, A., Caron, V., Forgeot d'Arc, B. et Soulières, I. (Publié comme résumé en ligne, mai 2020). Atypical sense of Agency in Autism : Intentional *un-binding* at the implicit level. Annual meeting of the International Society for Autism Research - 2020 (INSAR). Seattle, Washington, USA.

Caron, V., Lafleur, A., Forgeot d'Arc, B. & Soulières, I. (mars 2020). *Les difficultés motrices seraient-elles associées à la sous-estimation du potentiel intellectuel des personnes autistes?* Congrès annuel de la Société québécoise pour la recherche en psychologie (SQRP), Gatineau, Canada.

Caron, V., Lafleur, A., Forgeot d'Arc, B. & Soulières, I. (2019, novembre) *Sous-estimation du potentiel intellectuel des personnes autistes : implication de la motricité et de la théorie de l'esprit ?* Communication affichée présentée à la 7e Journée Scientifique de NeuroQAM, Montréal, Canada.

Caron, V., Lafleur, A., Forgeot d'Arc, B. & Soulières, I. (2019, septembre) *Lien entre la motricité fine, la Théorie de l'esprit et le fonctionnement intellectuel chez les adultes autistes.* Communication affichée présentée à la Journée de la recherche du centre intégré universitaire de santé et de services sociaux du Nord-de-l'Île-de-Montréal (CIUSSS-NIM), Montréal, Canada.

Lafleur, A., Hosein, A., Soulières, I., Forgeot d'Arc, B. (2016). Sens de l'agentivité implicite et explicite : une méthodologie innovante pour départager les indices sensorimoteurs et contextuels. Journée scientifique NeuroQÀM. Université du Québec à Montréal, Montréal, Canada.

Lafleur, A. et Boucher, V. J. (2014). Sens de l'agentivité, self-monitoring et apprentissage verbal: Parler à quelqu'un fait-il la différence? Journée scientifique NeuroQÀM. Université du Québec à Montréal, Montréal, Canada.

RÉFÉRENCES

- American Psychiatric Association. (1980). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders DSM-III* (3rd ed.): "American Psychiatric Association".
- American Psychiatric Association. (1987). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders DSM-III-R* (3rd ed.). Washington: American Psychiatric Association.
- American Psychiatric Association. (1994). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders DSM-IV* (4th ed.). Washington: American Psychiatric Association.
- American Psychiatric Association. (2000). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders DSM-IV-TR* (4th-Revised ed.). Washington: American Psychiatric Association.
- American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders : DSM-5* (5th ed.). Washington, DC: American Psychiatric Publishing.
- Annaz, D., Campbell, R., Coleman, M., Milne, E., & Swettenham, J. (2012). Young Children with Autism Spectrum Disorder Do Not Preferentially Attend to Biological Motion. *Journal of autism and developmental disorders*, 42(3), 401-408. doi:10.1007/s10803-011-1256-3
- Atkinson, A. P. (2009). Impaired recognition of emotions from body movements is associated with elevated motion coherence thresholds in autism spectrum disorders. *Neuropsychologia*, 47(13), 3023-3029.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.05.019>
- Baio, J., Wiggins, L., Christensen, D. L., Maenner, M. J., Daniels, J., Warren, Z., . . . Dowling, N. F. (2018). Prevalence of Autism Spectrum Disorder Among Children Aged 8 Years - Autism and Developmental Disabilities Monitoring Network, 11 Sites, United States, 2014. *Morbidity and mortality weekly report. Surveillance summaries* (Washington, D.C. : 2002), 67(6), 1-23.
doi:10.15585/mmwr.ss6706a1

- Baker, J. P. (2013). Autism at 70--redrawing the boundaries. *The New England journal of medicine*, 369(12), 1089.
- Balconi, M. (2010). The sense of agency in psychology and neuropsychology. In *Neuropsychology of the Sense of Agency* (pp. 3-22): Springer.
- Barnes, K. A., Howard Jr, J. H., Howard, D. V., Gilotty, L., Kenworthy, L., Gaillard, W. D., & Vaidya, C. J. (2008). Intact implicit learning of spatial context and temporal sequences in childhood autism spectrum disorder. *Neuropsychology*, 22(5), 563.
- Baron-Cohen, S. (1989). The Autistic Child's Theory of Mind: a Case of Specific Developmental Delay. *Journal of child psychology and psychiatry*, 30(2), 285-297. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1989.tb00241.x>
- Baron-Cohen, S., Jolliffe, T., Mortimore, C., & Robertson, M. (1997). Another Advanced Test of Theory of Mind: Evidence from Very High Functioning Adults with Autism or Asperger Syndrome. *Journal of child psychology and psychiatry*, 38(7), 813-822. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1997.tb01599.x>
- Baron-Cohen, S., Leslie, A. M., & Frith, U. (1985). Does the autistic child have a "theory of mind"? *Cognition*, 21(1), 37-46.
- Baron-Cohen, S., O'riordan, M., Stone, V., Jones, R., & Plaisted, K. (1999). Recognition of faux pas by normally developing children and children with Asperger syndrome or high-functioning autism. *Journal of autism and developmental disorders*, 29(5), 407-418.
- Baron-Cohen, S., Wheelwright, S., Hill, J., Raste, Y., & Plumb, I. (2001). The "Reading the Mind in the Eyes" Test revised version: a study with normal adults, and adults with Asperger syndrome or high-functioning autism. *The Journal of Child Psychology and Psychiatry and Allied Disciplines*, 42(2), 241-251.
- Baxter, A. J., Brugha, T. S., Erskine, H. E., Scheurer, R. W., Vos, T., & Scott, J. G. (2015). The epidemiology and global burden of autism spectrum disorders. *Psychol Med*, 45(3), 601-613. doi:10.1017/s003329171400172x
- Bell, V., Halligan, P. W., & Ellis, H. D. (2005). The Cardiff Anomalous Perceptions Scale (CAPS): A New Validated Measure of Anomalous Perceptual Experience. *Schizophrenia Bulletin*, 32(2), 366-377. doi:10.1093/schbul/sbj014

- Benvenuto, A., Moavero, R., Alessandrelli, R., Manzi, B., & Curatolo, P. (2009). Syndromic autism: causes and pathogenetic pathways. *World Journal of Pediatrics*, 5(3), 169-176. doi:10.1007/s12519-009-0033-2
- Bhat, A. N., Landa, R. J., & Galloway, J. C. (2011). Current Perspectives on Motor Functioning in Infants, Children, and Adults With Autism Spectrum Disorders. *Physical Therapy*, 91(7), 1116-1129. doi:10.2522/ptj.20100294
- Bhat, A. N., & Srinivasan, S. (2013). A review of “music and movement” therapies for children with autism: embodied interventions for multisystem development. *Frontiers in integrative neuroscience*, 7(22). doi:10.3389/fnint.2013.00022
- Blakemore, S.-J., Tavassoli, T., Calò, S., Thomas, R. M., Catmur, C., Frith, U., & Haggard, P. (2006). Tactile sensitivity in Asperger syndrome. *Brain and cognition*, 61(1), 5-13.
- Blakemore, S.-J., Wolpert, D., & Frith, C. (2000). Why can't you tickle yourself? *Neuroreport*, 11(11), R11-R16.
- Blakemore, S.-J., Wolpert, D. M., & Frith, C. D. (1998). Central cancellation of self-produced tickle sensation. *nature neuroscience*, 1(7), 635-640.
- Bölte, S., Girdler, S., & Marschik, P. B. (2019). The contribution of environmental exposure to the etiology of autism spectrum disorder. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 76(7), 1275-1297. doi:10.1007/s00018-018-2988-4
- Boucher, J., & Lewis, V. (1992). Unfamiliar Face Recognition in Relatively Able Autistic Children. *Journal of child psychology and psychiatry*, 33(5), 843-859. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1992.tb01960.x>
- Boucher, J., Lewis, V., & Collis, G. (1998). Familiar Face and Voice Matching and Recognition in Children with Autism. *Journal of child psychology and psychiatry*, 39(2), 171-181. doi:<https://doi.org/10.1111/1469-7610.00311>
- Bowler, D. M. (1992). “Theory of Mind” in Asperger's Syndrome Dermot M. Bowler. *Journal of child psychology and psychiatry*, 33(5), 877-893. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1992.tb01962.x>
- Bowler, D. M. (2007). *Autism spectrum disorders: Psychological theory and research*. New York, NY, US: John Wiley & Sons Ltd.

- Bridgeman, B., & Tseng, P. (2011). Embodied cognition and the perception-action link. *Physics of Life Reviews*, 8(1), 73-85.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.plrev.2011.01.002>
- Brown, J., Aczel, B., Jiménez, L., Kaufman, S. B., & Grant, K. P. (2010). Intact implicit learning in autism spectrum conditions. *The quarterly journal of experimental psychology*, 63(9), 1789-1812.
- Buxbaum, J. D. (2009). Multiple rare variants in the etiology of autism spectrum disorders. *Dialogues in clinical neuroscience*, 11(1), 35-43.
doi:[10.31887/DCNS.2009.11.1/jdbuxbaum](https://doi.org/10.31887/DCNS.2009.11.1/jdbuxbaum)
- Caglayan, A. O. (2010). Genetic causes of syndromic and non-syndromic autism. *Dev Med Child Neurol*, 52(2), 130-138. doi:[10.1111/j.1469-8749.2009.03523.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2009.03523.x)
- Caminha, R. C., & Lampreia, C. (2012). Findings on sensory deficits in autism: implications for understanding the disorder. *Psychology & Neuroscience*, 5, 231-237. Retrieved from
http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-32882012000200014&nrm=iso
- Casartelli, L., Molteni, M., & Ronconi, L. (2016). So close yet so far: Motor anomalies impacting on social functioning in autism spectrum disorder. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 63, 98-105.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.02.001>
- Cascio, C. J., Foss-Feig, J. H., Burnette, C. P., Heacock, J. L., & Cosby, A. A. (2012). The rubber hand illusion in children with autism spectrum disorders: delayed influence of combined tactile and visual input on proprioception. *Autism*, 16(4), 406-419. doi:[10.1177/1362361311430404](https://doi.org/10.1177/1362361311430404)
- Cattaneo, L., Fabbri-Destro, M., Boria, S., Pieraccini, C., Monti, A., Cossu, G., & Rizzolatti, G. (2007). Impairment of actions chains in autism and its possible role in intention understanding. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(45), 17825. doi:[10.1073/pnas.0706273104](https://doi.org/10.1073/pnas.0706273104)
- Celani, G., Battacchi, M. W., & Arcidiacono, L. (1999). The Understanding of the Emotional Meaning of Facial Expressions in People with Autism. *Journal of autism and developmental disorders*, 29(1), 57-66.
doi:[10.1023/A:1025970600181](https://doi.org/10.1023/A:1025970600181)
- Chambon, V., & Haggard, P. (2012). Sense of control depends on fluency of action selection, not motor performance. *Cognition*, 125(3), 441-451.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2012.07.011>

- Chevallier, C., Grèzes, J., Molesworth, C., Berthoz, S., & Happé, F. (2012). Brief Report: Selective Social Anhedonia in High Functioning Autism. *Journal of autism and developmental disorders*, 42(7), 1504-1509. doi:10.1007/s10803-011-1364-0
- Christensen, D. L., Braun, K. V. N., Baio, J., Bilder, D., Charles, J., Constantino, J. N., . . . Yeargin-Allsopp, M. (2018). Prevalence and Characteristics of Autism Spectrum Disorder Among Children Aged 8 Years - Autism and Developmental Disabilities Monitoring Network, 11 Sites, United States, 2012. *Morbidity and mortality weekly report. Surveillance summaries (Washington, D.C. : 2002)*, 65(13), 1-23. doi:10.15585/mmwr.ss6513a1
- Coll, S.-M., Foster, N. E. V., Meilleur, A., Brambati, S. M., & Hyde, K. L. (2020). Sensorimotor skills in autism spectrum disorder: A meta-analysis. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 76, 101570. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rasd.2020.101570>
- Constantino, J. N. (2013). Social Responsiveness Scale. In F. R. Volkmar (Ed.), *Encyclopedia of Autism Spectrum Disorders* (pp. 2919-2929). New York, NY: Springer New York.
- Cook, J. (2016). From movement kinematics to social cognition: the case of autism. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 371(1693), 20150372. doi:doi:10.1098/rstb.2015.0372
- Dapretto, M., Davies, M. S., Pfeifer, J. H., Scott, A. A., Sigman, M., Bookheimer, S. Y., & Iacoboni, M. (2006). Understanding emotions in others: mirror neuron dysfunction in children with autism spectrum disorders. *nature neuroscience*, 9(1), 28-30. doi:10.1038/nn1611
- David, F. J., Baranek, G. T., Giuliani, C. A., Mercer, V. S., Poe, M. D., & Thorpe, D. E. (2009). A pilot study: coordination of precision grip in children and adolescents with high functioning autism. *Pediatric Physical Therapy*, 21(2), 205.
- David, N., Gawronski, A., Santos, N. S., Huff, W., Lehnhardt, F.-G., Newen, A., & Vogeley, K. (2008). Dissociation between key processes of social cognition in autism: Impaired mentalizing but intact sense of agency. *Journal of autism and developmental disorders*, 38(4), 593-605.
- Demetriou, E. A., Lampit, A., Quintana, D. S., Naismith, S. L., Song, Y. J. C., Pye, J. E., . . . Guastella, A. J. (2018). Autism spectrum disorders: a meta-analysis of executive function. *Molecular Psychiatry*, 23(5), 1198-1204. doi:10.1038/mp.2017.75

- Desmurget, M., & Grafton, S. (2000). Forward modeling allows feedback control for fast reaching movements. *Trends Cogn Sci*, 4(11), 423-431.
doi:10.1016/s1364-6613(00)01537-0
- di Pellegrino, G., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., & Rizzolatti, G. (1992). Understanding motor events: a neurophysiological study. *Experimental Brain Research*, 91(1), 176-180. doi:10.1007/BF00230027
- Diallo, F. B., Fombonne, É., Kisely, S., Rochette, L., Vasiliadis, H. M., Vanasse, A., . . . Lesage, A. (2018). Prevalence and Correlates of Autism Spectrum Disorders in Quebec: Prévalence et corrélats des troubles du spectre de l'autisme au Québec. *Can J Psychiatry*, 63(4), 231-239.
doi:10.1177/0706743717737031
- Dziuk, M., Larson, J., Apostu, A., Mahone, E., Denckla, M., & Mostofsky, S. (2007). Dyspraxia in autism: association with motor, social, and communicative deficits. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 49(10), 734-739.
- Elsabbagh, M., Divan, G., Koh, Y.-J., Kim, Y. S., Kauchali, S., Marcín, C., . . . Fombonne, E. (2012). Global Prevalence of Autism and Other Pervasive Developmental Disorders. *Autism Research*, 5(3), 160-179.
doi:<https://doi.org/10.1002/aur.239>
- Enticott, P. G., Kennedy, H., Rinehart, N., Bradshaw, J., Tonge, B., Daskalakis, Z., & Fitzgerald, P. (2013). Interpersonal motor resonance in autism spectrum disorder: evidence against a global “mirror system” deficit. *Front Hum Neurosci*, 7(218). doi:10.3389/fnhum.2013.00218
- Enticott, P. G., Kennedy, H. A., Rinehart, N. J., Tonge, B. J., Bradshaw, J. L., Taffe, J. R., . . . Fitzgerald, P. B. (2012). Mirror Neuron Activity Associated with Social Impairments but not Age in Autism Spectrum Disorder. *Biol Psychiatry*, 71(5), 427-433.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2011.09.001>
- Esposito, G., Venuti, P., Maestro, S., & Muratori, F. (2009). An exploration of symmetry in early autism spectrum disorders: Analysis of lying. *Brain and Development*, 31(2), 131-138.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.braindev.2008.04.005>
- Fabbri-Destro, M., Cattaneo, L., Boria, S., & Rizzolatti, G. (2009). Planning actions in autism. *Experimental Brain Research*, 192(3), 521-525.
- Fan, Y.-T., Decety, J., Yang, C.-Y., Liu, J.-L., & Cheng, Y. (2010). Unbroken mirror neurons in autism spectrum disorders. *Journal of child psychology and*

- psychiatry*, 51(9), 981-988. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2010.02269.x>
- Finnemann, J., Plaisted-Grant, K., Moore, J., Teufel, C., & Fletcher, P. (2020). Low-level, prediction-based sensory and motor processes are unimpaired in Autism. *bioRxiv*, 2020.2009.2001.277160. doi:10.1101/2020.09.01.277160
- Flanagan, J. R., & Johansson, R. S. (2003). Action plans used in action observation. *Nature*, 424(6950), 769.
- Folstein, S. E., & Rosen-Sheidley, B. (2001). Genetics of autism: complex aetiology for a heterogeneous disorder. *Nature Reviews Genetics*, 2(12), 943-955. doi:10.1038/35103559
- Fombonne, E. (2003a). Epidemiological surveys of autism and other pervasive developmental disorders: an update. *J Autism Dev Disord*, 33(4), 365-382. doi:10.1023/a:1025054610557
- Fombonne, E. (2003b). Modern views of autism. *The Canadian Journal of Psychiatry / La Revue canadienne de psychiatrie*, 48(8), 503-505.
- Fombonne, E. (2018). Editorial: The rising prevalence of autism. *Journal of child psychology and psychiatry*, 59(7), 717-720. doi:<https://doi.org/10.1111/jcpp.12941>
- Fombonne, E., Marcin, C., Manero, A. C., Bruno, R., Diaz, C., Villalobos, M., . . . Nealy, B. (2016). Prevalence of Autism Spectrum Disorders in Guanajuato, Mexico: The Leon survey. *J Autism Dev Disord*, 46(5), 1669-1685. doi:10.1007/s10803-016-2696-6
- Forgeot d'Arc, B. (2014). Point de vue des neurosciences cognitives sur l'autisme. In *À la découverte de l'autisme* (pp. 44-57): Dunod.
- Forgeot d'Arc, B., Devaine, M., & Daunizeau, J. (2020). Social behavioural adaptation in Autism. *PLoS Computational Biology*, 16(3), e1007700. doi:10.1371/journal.pcbi.1007700
- Forgeot d'Arc, B., Ramus, F., Lefebvre, A., Brottier, D., Zalla, T., Moukawane, S., . . . Delorme, R. (2014). Atypical Social Judgment and Sensitivity to Perceptual Cues in Autism Spectrum Disorders. *Journal of autism and developmental disorders*, 46(5), 1574-1581. doi:10.1007/s10803-014-2208-5
- Forgeot d'Arc, B., & Mottron, L. (2012). Social cognition in autism. *Developmental Social Neuroscience and Childhood Brain Insult: Theory and Practice*, 299.

- Fountain, C., Winter, A. S., & Bearman, P. S. (2012). Six developmental trajectories characterize children with autism. *Pediatrics*, 129(5), e1112-e1120.
- Fournier, K. A., Hass, C. J., Naik, S. K., Lodha, N., & Cauraugh, J. H. (2010). Motor coordination in autism spectrum disorders: a synthesis and meta-analysis. *Journal of autism and developmental disorders*, 40(10), 1227-1240.
- Fournier, K. A., Kimberg, C. I., Radonovich, K. J., Tillman, M. D., Chow, J. W., Lewis, M. H., . . . Hass, C. J. (2010). Decreased static and dynamic postural control in children with autism spectrum disorders. *Gait & Posture*, 32(1), 6-9. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2010.02.007>
- Freitag, C. M., Konrad, C., Häberlen, M., Kleser, C., von Gontard, A., Reith, W., . . . Krick, C. (2008). Perception of biological motion in autism spectrum disorders. *Neuropsychologia*, 46(5), 1480-1494. doi:<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2007.12.025>
- Frith, U. (1989). *Autism: Explaining the enigma* (Vol. 1989): Wiley Online Library.
- Frith, U., Morton, J., & Leslie, A. M. (1991). The cognitive basis of a biological disorder: autism. *Trends in neurosciences*, 14(10), 433-438.
- Fuentes, C. T., Mostofsky, S. H., & Bastian, A. J. (2009). Children with autism show specific handwriting impairments. *Neurology*, 73(19), 1532. doi:[10.1212/WNL.0b013e3181c0d48c](https://doi.org/10.1212/WNL.0b013e3181c0d48c)
- Gallagher, S. (2000). Philosophical conceptions of the self: implications for cognitive science. *Trends in cognitive sciences*, 4(1), 14-21.
- Gallagher, S., & Varga, S. (2015). Conceptual issues in autism spectrum disorders. *Current Opinion in Psychiatry*, 28(2). Retrieved from https://journals.lww.com/co-psychiatry/Fulltext/2015/03000/Conceptual_issues_in_autism_spectrum_disorders.10.aspx
- Gallese, V. (2006). Intentional attunement: a neurophysiological perspective on social cognition and its disruption in autism. *Brain Res*, 1079(1), 15-24. doi:[10.1016/j.brainres.2006.01.054](https://doi.org/10.1016/j.brainres.2006.01.054)
- Gallese, V., Rochat, M. J., & Berchio, C. (2013). The mirror mechanism and its potential role in autism spectrum disorder. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 55(1), 15-22. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2012.04398.x>

- Geschwind, D. H., & Levitt, P. (2007). Autism spectrum disorders: developmental disconnection syndromes. *Current Opinion in Neurobiology, 17*(1), 103-111. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conb.2007.01.009>
- Gima, H., Kihara, H., Watanabe, H., Nakano, H., Nakano, J., Konishi, Y., . . . Taga, G. (2018). Early motor signs of autism spectrum disorder in spontaneous position and movement of the head. *Experimental Brain Research, 236*(4), 1139-1148. doi:[10.1007/s00221-018-5202-x](https://doi.org/10.1007/s00221-018-5202-x)
- Gizzonio, V., Avanzini, P., Campi, C., Orivoli, S., Piccolo, B., Cantalupo, G., . . . Fabbri-Destro, M. (2015). Failure in pantomime action execution correlates with the severity of social behavior deficits in children with autism: a praxis study. *Journal of autism and developmental disorders, 45*(10), 3085-3097.
- Goldman, S. (2013). Opinion: Sex, gender and the diagnosis of autism—A biosocial view of the male preponderance. *Research in Autism Spectrum Disorders, 7*(6), 675-679. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rasd.2013.02.006>
- Gowen, E., & Hamilton, A. (2013). Motor abilities in autism: a review using a computational context. *Journal of autism and developmental disorders, 43*(2), 323-344.
- Gowen, E., & Miall, R. C. (2005). Behavioural aspects of cerebellar function in adults with Asperger syndrome. *The Cerebellum, 4*(4), 279-289.
- Grainger, C., Williams, D. M., & Lind, S. E. (2014). Online action monitoring and memory for self-performed actions in autism spectrum disorder. *Journal of autism and developmental disorders, 44*(5), 1193.
- Green, D., Baird, G., Barnett, A. L., Henderson, L., Huber, J., & Henderson, S. E. (2002). The severity and nature of motor impairment in Asperger's syndrome: a comparison with specific developmental disorder of motor function. *Journal of child psychology and psychiatry, 43*(5), 655-668.
- Green, D., Charman, T., Pickles, A., Chandler, S., Loucas, T., Simonoff, E., & Baird, G. (2009). Impairment in movement skills of children with autistic spectrum disorders. *Developmental Medicine & Child Neurology, 51*(4), 311-316.
- Grimm, P. (2010). Social Desirability Bias. In *Wiley International Encyclopedia of Marketing*.
- Gross, T. F. (2004). The Perception of Four Basic Emotions in Human and Nonhuman Faces by Children With Autism and Other Developmental

- Disabilities. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 32(5), 469-480.
doi:10.1023/B:JACP.0000037777.17698.01
- Grynszpan, O., Nadel, J., Martin, J.-C., Simonin, J., Bailleul, P., Wang, Y., . . . Constant, J. (2012). Self-monitoring of gaze in high functioning autism. *Journal of autism and developmental disorders*, 42(8), 1642-1650.
- Guillon, Q., Hadjikhani, N., Baduel, S., & Rogé, B. (2014). Visual social attention in autism spectrum disorder: Insights from eye tracking studies. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 42, 279-297.
- Haggard, P. (2017). Sense of agency in the human brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 18, 196. doi:10.1038/nrn.2017.14
- Haggard, P., Clark, S., & Kalogeras, J. (2002). Voluntary action and conscious awareness. *nature neuroscience*, 5(4), 382.
- Haggard, P., Martin, F., Taylor-Clarke, M., Jeannerod, M., & Franck, N. (2003). Awareness of action in schizophrenia. *Neuroreport*, 14(7), 1081-1085.
doi:10.1097/01.wnr.0000073684.00308.c0
- Hallett, M., Lebiedowska, M. K., Thomas, S. L., Stanhope, S. J., Denckla, M. B., & Rumsey, J. (1993). Locomotion of autistic adults. *Archives of Neurology*, 50(12), 1304-1308.
- Hallmayer, J., Cleveland, S., Torres, A., Phillips, J., Cohen, B., Torigoe, T., . . . Risch, N. (2011). Genetic Heritability and Shared Environmental Factors Among Twin Pairs With Autism. *Archives of General Psychiatry*, 68(11), 1095-1102. doi:10.1001/archgenpsychiatry.2011.76
- Hamilton, A. F. d. C. (2008). Emulation and mimicry for social interaction: A theoretical approach to imitation in autism. *The quarterly journal of experimental psychology*, 61(1), 101-115. doi:10.1080/17470210701508798
- Hamilton, A. F. d. C. (2013). Reflecting on the mirror neuron system in autism: A systematic review of current theories. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 3, 91-105. doi:<https://doi.org/10.1016/j.dcn.2012.09.008>
- Hamilton, A. F. d. C., Brindley, R. M., & Frith, U. (2007). Imitation and action understanding in autistic spectrum disorders: How valid is the hypothesis of a deficit in the mirror neuron system? *Neuropsychologia*, 45(8), 1859-1868.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.11.022>

- Hannant, P., Tavassoli, T., & Cassidy, S. (2016). The Role of Sensorimotor Difficulties in Autism Spectrum Conditions. *Frontiers in Neurology*, 7(124). doi:10.3389/fneur.2016.00124
- Happé, F. (1995a). *Autism: An introduction to psychological theory*: Harvard University Press.
- Happé, F. (1995b). The Role of Age and Verbal Ability in the Theory of Mind Task Performance of Subjects with Autism. *Child Development*, 66(3), 843-855. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.1995.tb00909.x>
- Happé, F., & Frith, U. (2006). The weak coherence account: detail-focused cognitive style in autism spectrum disorders. *Journal of autism and developmental disorders*, 36(1), 5-25.
- Hardy, M., & LaGasse, A. B. (2013). Rhythm, movement, and autism: using rhythmic rehabilitation research as a model for autism. *Frontiers in integrative neuroscience*, 7(19). doi:10.3389/fnint.2013.00019
- Haswell, C. C., Izawa, J., Dowell, L. R., Mostofsky, S. H., & Shadmehr, R. (2009). Representation of internal models of action in the autistic brain. *nature neuroscience*, 12(8), 970-972.
- Hill, E. L. (2004a). Evaluating the theory of executive dysfunction in autism. *Developmental Review*, 24(2), 189-233. doi:10.1016/j.dr.2004.01.001
- Hill, E. L. (2004b). Executive dysfunction in autism. *Trends in cognitive sciences*, 8(1), 26-32. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tics.2003.11.003>
- Hocking, D. R., & Caeyenberghs, K. (2017). What is the Nature of Motor Impairments in Autism, Are They Diagnostically Useful, and What Are the Implications for Intervention? *Current Developmental Disorders Reports*, 4(2), 19-27. doi:10.1007/s40474-017-0109-y
- Hommel, B., Brown, S. B. R. E., & Nattkemper, D. (2016). Action Monitoring. In B. Hommel, S. B. R. E. Brown, & D. Nattkemper (Eds.), *Human Action Control: From Intentions to Movements* (pp. 197-213). Cham: Springer International Publishing.
- Hughes, C., Russell, J., & Robbins, T. W. (1994). Evidence for executive dysfunction in autism. *Neuropsychologia*, 32(4), 477-492. doi:[https://doi.org/10.1016/0028-3932\(94\)90092-2](https://doi.org/10.1016/0028-3932(94)90092-2)

- Humphreys, G. R., & Buehner, M. J. (2010). Temporal binding of action and effect in interval reproduction. *Experimental Brain Research*, 203(2), 465-470.
- Iacoboni, M., & Dapretto, M. (2006). The mirror neuron system and the consequences of its dysfunction. *Nature Reviews Neuroscience*, 7(12), 942-951. doi:10.1038/nrn2024
- Idring, S., Lundberg, M., Sturm, H., Dalman, C., Gumpert, C., Rai, D., . . . Magnusson, C. (2015). Changes in Prevalence of Autism Spectrum Disorders in 2001–2011: Findings from the Stockholm Youth Cohort. *Journal of autism and developmental disorders*, 45(6), 1766-1773. doi:10.1007/s10803-014-2336-y
- Imaiizumi, S., & Tanno, Y. (2019). Intentional binding coincides with explicit sense of agency. *Consciousness and cognition*, 67, 1-15. doi:<https://doi.org/10.1016/j.concog.2018.11.005>
- Izawa, J., Pekny, S. E., Marko, M. K., Haswell, C. C., Shadmehr, R., & Mostofsky, S. H. (2012). Motor Learning Relies on Integrated Sensory Inputs in ADHD, but Over-Selectively on Proprioception in Autism Spectrum Conditions. *Autism Research*, 5(2), 124-136.
- Jemel, B., Mottron, L., & Dawson, M. (2006). Impaired Face Processing in Autism: Fact or Artifact? *Journal of autism and developmental disorders*, 36(1), 91-106. doi:10.1007/s10803-005-0050-5
- Jeste, S. S., & Geschwind, D. H. (2014). Disentangling the heterogeneity of autism spectrum disorder through genetic findings. *Nature Reviews Neurology*, 10(2), 74-81. doi:10.1038/nrneurol.2013.278
- Jurado, M. B., & Rosselli, M. (2007). The Elusive Nature of Executive Functions: A Review of our Current Understanding. *Neuropsychology Review*, 17(3), 213-233. doi:10.1007/s11065-007-9040-z
- Kanner, L. (1943). Autistic disturbances of affective contact.
- Kaur, M., & Bhat, A. N. (2019). Creative Yoga Intervention Improves Motor and Imitation Skills of Children With Autism Spectrum Disorder. *Physical Therapy*, 99(11), 1520-1534. doi:10.1093/ptj/pzz115
- Kaur, M., M. Srinivasan, S., & N. Bhat, A. N. (2018). Comparing motor performance, praxis, coordination, and interpersonal synchrony between children with and without Autism Spectrum Disorder (ASD). *Research in*

- Developmental Disabilities*, 72, 79-95.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ridd.2017.10.025>
- Kern, P., & Humpal, M. (2015). Early Childhood Music Therapy and Autism Spectrum Disorders: Developing Potential in Young Children and Their Families. In B. L. Wheeler (Ed.), *Music Therapy Handbook*. Philadelphia: Guilford Publications.
- Kim, J., Wigram, T., & Gold, C. (2009). Emotional, motivational and interpersonal responsiveness of children with autism in improvisational music therapy. *Autism*, 13(4), 389-409. doi:10.1177/1362361309105660
- Kim, Y. S., Leventhal, B. L., Koh, Y.-J., Fombonne, E., Laska, E., Lim, E.-C., . . . Grinker, R. R. (2011). Prevalence of Autism Spectrum Disorders in a Total Population Sample. *American Journal of Psychiatry*, 168(9), 904-912. doi:10.1176/appi.ajp.2011.10101532
- Klin, A., Jones, W., Schultz, R., Volkmar, F., & Cohen, D. (2002). Defining and quantifying the social phenotype in autism. *American Journal of Psychiatry*, 159(6), 895-908.
- Knoblich, G., & Flach, R. (2001). Predicting the effects of actions: Interactions of perception and action. *Psychological science*, 12(6), 467-472.
- Kochukhova, O., & Gredebäck, G. (2010). Preverbal Infants Anticipate That Food Will Be Brought to the Mouth: An Eye Tracking Study of Manual Feeding and Flying Spoons. *Child Development*, 81(6), 1729-1738. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2010.01506.x>
- Koehne, S., Behrends, A., Fairhurst, M. T., & Dziobek, I. (2016). Fostering Social Cognition through an Imitation- and Synchronization-Based Dance/Movement Intervention in Adults with Autism Spectrum Disorder: A Controlled Proof-of-Concept Study. *Psychotherapy and Psychosomatics*, 85(1), 27-35. doi:10.1159/000441111
- Lafleur, A., Soulières, I., & Forgeot d'Arc, B. (2020). Sense of agency: Sensorimotor signals and social context are differentially weighed at implicit and explicit levels. *Consciousness and cognition*, 84, 103004. doi:<https://doi.org/10.1016/j.concog.2020.103004>
- Lafleur, A., Soulières, I., & Forgeot d'Arc, B. (2016). Cognition sociale et sens de l'agentivité en autisme: de l'action à l'interaction. *Santé mentale au Québec*, 41(1), 163-181.

- Leslie, A. M., & Roth, D. (1993). What autism teaches us about metarepresentation. In S. Baron-Cohen, H. Tager-Flusberg, & D. J. Cohen (Eds.), *Understanding other minds: Perspectives from autism*. (pp. 83-111). New York, NY, US: Oxford University Press.
- Leslie, A. M., & Thaiss, L. (1992). Domain specificity in conceptual development: neuropsychological evidence from autism. *Cognition*, 43(3), 225-251.
doi:10.1016/0010-0277(92)90013-8
- Lezak, M. D., Howieson, D. B., Loring, D. W., Hannay, H. J., & Fisher, J. S. (2004). *Neuropsychological Assessment* (4th edition ed.): Oxford University Press.
- Lind, S. E., & Williams, D. M. (2011). Behavioural, Biopsychosocial, and Cognitive Models of Autism Spectrum Disorders. In J. L. Matson & P. Sturmey (Eds.), *International Handbook of Autism and Pervasive Developmental Disorders* (pp. 99-114). New York, NY: Springer New York.
- Liu, T., & Breslin, C. M. (2013). Fine and gross motor performance of the MABC-2 by children with autism spectrum disorder and typically developing children. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 7(10), 1244-1249.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.rasd.2013.07.002>
- Lukito, S., Jones, C. R. G., Pickles, A., Baird, G., Happé, F., Charman, T., & Simonoff, E. (2017). Specificity of executive function and theory of mind performance in relation to attention-deficit/hyperactivity symptoms in autism spectrum disorders. *Molecular Autism*, 8(1), 60. doi:10.1186/s13229-017-0177-1
- MacNeil, L. K., & Mostofsky, S. H. (2012). Specificity of dyspraxia in children with autism. *Neuropsychology*, 26(2), 165.
- Maeda, T., Takahata, K., Muramatsu, T., Okimura, T., Koreki, A., Iwashita, S., . . . Kato, M. (2013). Reduced sense of agency in chronic schizophrenia with predominant negative symptoms. *Psychiatry Research*, 209(3), 386-392.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.psychres.2013.04.017>
- Maenner, M. J., Shaw, K. A., Baio, J., EdS, Washington, A., Patrick, M., . . . Dietz, P. M. (2020). Prevalence of Autism Spectrum Disorder Among Children Aged 8 Years - Autism and Developmental Disabilities Monitoring Network, 11 Sites, United States, 2016. *Morbidity and mortality weekly report. Surveillance summaries (Washington, D.C. : 2002)*, 69(4), 1-12.
doi:10.15585/mmwr.ss6904a1

- Mandy, W. P. L., & Skuse, D. H. (2008). Research Review: What is the association between the social-communication element of autism and repetitive interests, behaviours and activities? *Journal of child psychology and psychiatry*, 49(8), 795-808. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2008.01911.x>
- Mari, M., Castiello, U., Marks, D., Marraffa, C., & Prior, M. (2003). The reach-to-grasp movement in children with autism spectrum disorder. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 358(1430), 393-403. doi:[doi:10.1098/rstb.2002.1205](https://doi.org/10.1098/rstb.2002.1205)
- Martineau, J., Cochin, S., Magne, R., & Barthelemy, C. (2008). Impaired cortical activation in autistic children: Is the mirror neuron system involved? *International Journal of Psychophysiology*, 68(1), 35-40. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2008.01.002>
- Mechsner, F., Kerzel, D., Knoblich, G., & Prinz, W. (2001). Perceptual basis of bimanual coordination. *Nature*, 414(6859), 69-73.
- Mezzacappa, A., Lasica, P.-A., Gianfagna, F., Cazas, O., Hardy, P., Falissard, B., . . . Gressier, F. (2017). Risk for Autism Spectrum Disorders According to Period of Prenatal Antidepressant Exposure: A Systematic Review and Meta-analysis. *JAMA Pediatrics*, 171(6), 555-563. doi:[10.1001/jamapediatrics.2017.0124](https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2017.0124)
- Miller, M., Chukoskie, L., Zinni, M., Townsend, J., & Trauner, D. (2014). Dyspraxia, motor function and visual-motor integration in autism. *Behavioural Brain Research*, 269, 95-102. doi:<https://doi.org/10.1016/j.bbr.2014.04.011>
- Milne, E., Dickinson, A., & Smith, R. (2017). Adults with autism spectrum conditions experience increased levels of anomalous perception. *PloS one*, 12(5), e0177804. doi:[10.1371/journal.pone.0177804](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0177804)
- Ming, X., Brimacombe, M., & Wagner, G. C. (2007). Prevalence of motor impairment in autism spectrum disorders. *Brain and Development*, 29(9), 565-570.
- Minschew, N. J., Goldstein, G., Muenz, L. R., & Payton, J. B. (1992). Neuropsychological functioning in nonmentally retarded autistic individuals. *J Clin Exp Neuropsychol*, 14(5), 749-761. doi:[10.1080/01688639208402860](https://doi.org/10.1080/01688639208402860)
- Minschew, N. J., Sung, K., Jones, B. L., & Furman, J. M. (2004). Underdevelopment of the postural control system in autism. *Neurology*, 63(11), 2056-2061. doi:[10.1212/01.WNL.0000145771.98657.62](https://doi.org/10.1212/01.WNL.0000145771.98657.62)

- Moore, J. W., & Fletcher, P. C. (2012). Sense of agency in health and disease: A review of cue integration approaches. *Consciousness and cognition*, 21(1), 59-68. doi:<https://doi.org/10.1016/j.concog.2011.08.010>
- Moore, J. W., & Haggard, P. (2008). Awareness of action: Inference and prediction. *Consciousness and cognition*, 17(1), 136-144. doi:<https://doi.org/10.1016/j.concog.2006.12.004>
- Moore, J. W., Wegner, D. M., & Haggard, P. (2009). Modulating the sense of agency with external cues. *Consciousness and cognition*, 18(4), 1056-1064. doi:<https://doi.org/10.1016/j.concog.2009.05.004>
- Morris, S. L., Foster, C. J., Parsons, R., Falkmer, M., Falkmer, T., & Rosalie, S. M. (2015). Differences in the use of vision and proprioception for postural control in autism spectrum disorder. *Neuroscience*, 307, 273-280. doi:<https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2015.08.040>
- Morton, J., & Frith, U. (1995). Causal modeling: A structural approach to developmental psychopathology [John Wiley & Sons]. Retrieved
- Mosconi, M. W., Luna, B., Kay-Stacey, M., Nowinski, C. V., Rubin, L. H., Scudder, C., . . . Sweeney, J. A. (2013). Saccade adaptation abnormalities implicate dysfunction of cerebellar-dependent learning mechanisms in autism spectrum disorders (ASD). *PloS one*, 8(5), e63709.
- Mosconi, M. W., Mohanty, S., Greene, R. K., Cook, E. H., Vaillancourt, D. E., & Sweeney, J. A. (2015). Feedforward and Feedback Motor Control Abnormalities Implicate Cerebellar Dysfunctions in Autism Spectrum Disorder. *The Journal of Neuroscience*, 35(5), 2015. doi:10.1523/JNEUROSCI.2731-14.2015
- Mosconi, M. W., & Sweeney, J. A. (2015). Sensorimotor dysfunctions as primary features of autism spectrum disorders. *Science China Life Sciences*, 58(10), 1016-1023. doi:10.1007/s11427-015-4894-4
- Mostofsky, S. H., & Ewen, J. B. (2011). Altered connectivity and action model formation in autism is autism. *The Neuroscientist*, 17(4), 437-448.
- Mostofsky, S. H., Goldberg, M. C., Landa, R. J., & Denckla, M. B. (2000). Evidence for a deficit in procedural learning in children and adolescents with autism: implications for cerebellar contribution. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 6(07), 752-759.

- Mottron, L., & Burack, J. A. (2001). Enhanced perceptual functioning in the development of autism.
- Mottron, L., Dawson, M., Soulieres, I., Hubert, B., & Burack, J. (2006). Enhanced perceptual functioning in autism: An update, and eight principles of autistic perception. *Journal of autism and developmental disorders*, 36(1), 27-43.
- Muthukumaraswamy, S. D., Johnson, B. W., & McNair, N. A. (2004). Mu rhythm modulation during observation of an object-directed grasp. *Cognitive Brain Research*, 19(2), 195-201.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2003.12.001>
- National Institute of Mental Health. (2019). Sensorimotor Domain Added to the RDoC Framework. Retrieved from <https://www.nimh.nih.gov/news/science-news/2019/sensorimotor-domain-added-to-the-rdoc-framework.shtml>
- Nemeth, D., Janacsek, K., Balogh, V., Londe, Z., Mingesz, R., Fazekas, M., . . . Vetro, A. (2010). Learning in autism: implicitly superb. *PloS one*, 5(7), e11731.
- Oberman, L. M., Hubbard, E. M., McCleery, J. P., Altschuler, E. L., Ramachandran, V. S., & Pineda, J. A. (2005). EEG evidence for mirror neuron dysfunction in autism spectrum disorders. *Cognitive Brain Research*, 24(2), 190-198.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2005.01.014>
- Oberman, L. M., Ramachandran, V. S., & Pineda, J. A. (2008). Modulation of mu suppression in children with autism spectrum disorders in response to familiar or unfamiliar stimuli: The mirror neuron hypothesis. *Neuropsychologia*, 46(5), 1558-1565. doi:<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2008.01.010>
- Ozonoff, S., & Jensen, J. (1999). Brief Report: Specific Executive Function Profiles in Three Neurodevelopmental Disorders. *Journal of autism and developmental disorders*, 29(2), 171-177. doi:10.1023/A:1023052913110
- Ozonoff, S., Rogers, S. J., & Pennington, B. F. (1991). Asperger's Syndrome: Evidence of an Empirical Distinction from High-Functioning Autism. *Journal of child psychology and psychiatry*, 32(7), 1107-1122.
doi:<https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1991.tb00352.x>
- Pan, C.-Y., Tsai, C.-L., & Chu, C.-H. (2009). Fundamental Movement Skills in Children Diagnosed with Autism Spectrum Disorders and Attention Deficit Hyperactivity Disorder. *Journal of autism and developmental disorders*, 39(12), 1694. doi:10.1007/s10803-009-0813-5

- Paquet, A., Olliac, B., Golse, B., & Vaivre-Douret, L. (2016). Current knowledge on motor disorders in children with autism spectrum disorder (ASD). *Child Neuropsychology, 22*(7), 763-794. doi:10.1080/09297049.2015.1085501
- Paquet, A., Olliac, B., Golse, B., & Vaivre-Douret, L. (2019). Nature of motor impairments in autism spectrum disorder: A comparison with developmental coordination disorder. *J Clin Exp Neuropsychol, 41*(1), 1-14. doi:10.1080/13803395.2018.1483486
- Peñuelas-Calvo, I., Sareen, A., Sevilla-Llewellyn-Jones, J., & Fernández-Berrocal, P. (2019). The “Reading the Mind in the Eyes” Test in Autism-Spectrum Disorders Comparison with Healthy Controls: A Systematic Review and Meta-analysis. *Journal of autism and developmental disorders, 49*(3), 1048-1061. doi:10.1007/s10803-018-3814-4
- Pérez-Crespo, L., Prats-Uribe, A., Tobias, A., Duran-Tauleria, E., Coronado, R., Hervás, A., & Guxens, M. (2019). Temporal and Geographical Variability of Prevalence and Incidence of Autism Spectrum Disorder Diagnoses in Children in Catalonia, Spain. *Autism Research, 12*(11), 1693-1705. doi:<https://doi.org/10.1002/aur.2172>
- Pinkham, A. E., Harvey, P. D., & Penn, D. L. (2018). Social Cognition Psychometric Evaluation: Results of the Final Validation Study. *Schizophr Bull, 44*(4), 737-748. doi:10.1093/schbul/sbx117
- Ponnet, K., Buysse, A., Roeyers, H., & De Clercq, A. (2008). Mind-reading in young adults with ASD: does structure matter? *J Autism Dev Disord, 38*(5), 905-918. doi:10.1007/s10803-007-0462-5
- Postorino, V., Fatta, L. M., Sanges, V., Giovagnoli, G., De Peppo, L., Vicari, S., & Mazzone, L. (2016). Intellectual disability in Autism Spectrum Disorder: Investigation of prevalence in an Italian sample of children and adolescents. *Research in Developmental Disabilities, 48*, 193-201. doi:10.1016/j.ridd.2015.10.020
- Prevost, M., Carrier, M.-E., Chowne, G., Zelkowitz, P., Joseph, L., & Gold, I. (2014). The Reading the Mind in the Eyes test: validation of a French version and exploration of cultural variations in a multi-ethnic city. *Cognitive Neuropsychiatry, 19*(3), 189-204.
- Pyasik, M., Burin, D., & Pia, L. (2018). On the relation between body ownership and sense of agency: A link at the level of sensory-related signals. *Acta Psychologica, 185*, 219-228. doi:<https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2018.03.001>

- Rajendran, G., & Mitchell, P. (2007). Cognitive theories of autism. *Developmental Review*, 27(2), 224-260. doi:<https://doi.org/10.1016/j.dr.2007.02.001>
- Ramachandran, V. S., & Oberman, L. M. (2006). Broken mirrors: a theory of autism. *Sci Am*, 295(5), 62-69. doi:10.1038/scientificamerican1106-62
- Rasetti, R., & Weinberger, D. R. (2011). Intermediate phenotypes in psychiatric disorders. *Curr Opin Genet Dev*, 21(3), 340-348. doi:10.1016/j.gde.2011.02.003
- Robledo, J., Donnellan, A., & Strandt-Conroy, K. (2012). An exploration of sensory and movement differences from the perspective of individuals with autism. *Frontiers in integrative neuroscience*, 6(107). doi:10.3389/fnint.2012.00107
- Rochat, P., & Hespos, S. J. (1997). Differential rooting response by neonates: evidence for an early sense of self. *Early Development and Parenting*, 6(3-4), 105-112. doi:[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0917\(199709/12\)6:3/4<105::AID-EDP150>3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0917(199709/12)6:3/4<105::AID-EDP150>3.0.CO;2-U)
- Rodriguez-Fornells, A., Rojo, N., Amengual, J. L., Ripollés, P., Altenmüller, E., & Münte, T. F. (2012). The involvement of audio-motor coupling in the music-supported therapy applied to stroke patients. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1252(1), 282-293. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2011.06425.x>
- Rothi, L. J. G., & Heilman, K. M. (2014). *Apraxia: The Neuropsychology of Action*: Taylor & Francis.
- Ruggeri, A., Dancel, A., Johnson, R., & Sargent, B. (2019). The effect of motor and physical activity intervention on motor outcomes of children with autism spectrum disorder: A systematic review. *Autism*, 24(3), 544-568. doi:10.1177/1362361319885215
- Russell, J. (1996). *Agency: Its Role in Mental Development*: Psychology Press.
- Russell, J., & Hill, E. L. (2001). Action-monitoring and Intention Reporting in Children with Autism. *Journal of child psychology and psychiatry*, 42(3), 317-328. doi:<https://doi.org/10.1111/1469-7610.00725>
- Rutherford, M. D., & Troje, N. F. (2012). IQ Predicts Biological Motion Perception in Autism Spectrum Disorders. *Journal of autism and developmental disorders*, 42(4), 557-565. doi:10.1007/s10803-011-1267-0

- Sandin, S., Lichtenstein, P., Kuja-Halkola, R., Hultman, C., Larsson, H., & Reichenberg, A. (2017). The Heritability of Autism Spectrum Disorder. *JAMA*, 318(12), 1182-1184. doi:10.1001/jama.2017.12141
- Schmitt, L. (2013). Finger-Tapping Test. In F. R. Volkmar (Ed.), *Encyclopedia of Autism Spectrum Disorders* (pp. 1296-1296). New York, NY: Springer New York.
- Schmitz, C., Martineau, J., Barthélémy, C., & Assaiante, C. (2003). Motor control and children with autism: deficit of anticipatory function? *Neuroscience letters*, 348(1), 17-20.
- Scott, F. J., & Baron-Cohen, S. (1996). Imagining Real and Unreal Things: Evidence of a Dissociation in Autism. *Journal of cognitive neuroscience*, 8(4), 371-382. doi:10.1162/jocn.1996.8.4.371 %M 23971507
- Shergill, S. S., Samson, G., Bays, P. M., Frith, C. D., & Wolpert, D. M. (2005). Evidence for sensory prediction deficits in schizophrenia. *American Journal of Psychiatry*, 162(12), 2384-2386.
- Southgate, V., & de C. Hamilton, A. F. (2008). Unbroken mirrors: challenging a theory of Autism. *Trends in cognitive sciences*, 12(6), 225-229. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.03.005>
- Sperduti, M., Pieron, M., Leboyer, M., & Zalla, T. (2014). Altered pre-reflective sense of agency in autism spectrum disorders as revealed by reduced intentional binding. *Journal of autism and developmental disorders*, 44(2), 343-352.
- Synofzik, M., Thier, P., Leube, D. T., Schlotterbeck, P., & Lindner, A. (2009). Misattributions of agency in schizophrenia are based on imprecise predictions about the sensory consequences of one's actions. *Brain*, 133(1), 262-271. doi:10.1093/brain/awp291
- Synofzik, M., Vosgerau, G., & Newen, A. (2008). Beyond the comparator model: a multifactorial two-step account of agency. *Consciousness and cognition*, 17(1), 219-239.
- Synofzik, M., Vosgerau, G., & Voss, M. (2013). The experience of agency: an interplay between prediction and postdiction. *Frontiers in psychology*, 4.
- Synofzik, M., & Voss, M. (2010). Disturbances of the sense of agency in schizophrenia. In *Neuropsychology of the Sense of Agency* (pp. 145-155): Springer.

- Szalai, J. (2019). The Sense of Agency in OCD. *Review of Philosophy and Psychology*, 10(2), 363-380. doi:10.1007/s13164-017-0371-2
- Théoret, H., Halligan, E., Kobayashi, M., Fregni, F., Tager-Flusberg, H., & Pascual-Leone, A. (2005). Impaired motor facilitation during action observation in individuals with autism spectrum disorder. *Current Biology*, 15(3), R84-R85. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cub.2005.01.022>
- Tick, B., Bolton, P., Happé, F., Rutter, M., & Rijsdijk, F. (2016). Heritability of autism spectrum disorders: a meta-analysis of twin studies. *Journal of child psychology and psychiatry, and allied disciplines*, 57(5), 585-595. doi:10.1111/jcpp.12499
- Torres, E., Yanovich, P., & Metaxas, D. (2013). Give spontaneity and self-discovery a chance in ASD: spontaneous peripheral limb variability as a proxy to evoke centrally driven intentional acts. *Frontiers in integrative neuroscience*, 7(46). doi:10.3389/fnint.2013.00046
- Tracy, J. L., Robins, R. W., Schriber, R. A., & Solomon, M. (2011). Is Emotion Recognition Impaired in Individuals with Autism Spectrum Disorders? *Journal of autism and developmental disorders*, 41(1), 102-109. doi:10.1007/s10803-010-1030-y
- Van Waelvelde, H., Oostra, A., Dewitte, G., Van Den Broeck, C., & Jongmans, M. J. (2010). Stability of motor problems in young children with or at risk of autism spectrum disorders, ADHD, and or developmental coordination disorder. *Dev Med Child Neurol*, 52(8), e174-178. doi:10.1111/j.1469-8749.2009.03606.x
- Visuri, I. (2020). Sensory supernatural experiences in autism. *Religion, Brain & Behavior*, 10(2), 151-165. doi:10.1080/2153599X.2018.1548374
- Voineskos, A. N., Lett, T. A. P., Lerch, J. P., Tiwari, A. K., Ameis, S. H., Rajji, T. K., . . . Kennedy, J. L. (2011). Neurexin-1 and Frontal Lobe White Matter: An Overlapping Intermediate Phenotype for Schizophrenia and Autism Spectrum Disorders. *PloS one*, 6(6), e20982. doi:10.1371/journal.pone.0020982
- Volkmar, F. R., & Klin, A. (2005). Issues in the Classification of Autism and Related Conditions. In *Handbook of autism and pervasive developmental disorders: Diagnosis, development, neurobiology, and behavior*, Vol. 1, 3rd ed. (pp. 5-41). Hoboken, NJ, US: John Wiley & Sons Inc.
- Volkmar, F. R., & Reichow, B. (2013). Autism in DSM-5: progress and challenges. *Molecular Autism*, 4(1), 13. doi:10.1186/2040-2392-4-13

- Von Hofsten, C. (2004). An action perspective on motor development. *Trends in cognitive sciences*, 8(6), 266-272.
- von Hofsten, C. (2009). Action, the foundation for cognitive development. *Scandinavian Journal of Psychology*, 50(6), 617-623. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1467-9450.2009.00780.x>
- von Hofsten, C., & Rosander, K. (2012). Perception-action in children with ASD. *Frontiers in integrative neuroscience*, 6, 115.
- Voss, M., Moore, J. W., Hauser, M., Gallinat, J., Heinz, A., & Haggard, P. (2010). Altered awareness of action in schizophrenia: a specific deficit in predicting action consequences. *Brain*, 133(10), 3104-3112.
- Wang, C., Geng, H., Liu, W., & Zhang, G. (2017). Prenatal, perinatal, and postnatal factors associated with autism: A meta-analysis. *Medicine*, 96(18), e6696. doi:[10.1097/md.00000000000006696](https://doi.org/10.1097/md.00000000000006696)
- Wang, Z., Magnan, G. C., White, S. P., Greene, R. K., Vaillancourt, D. E., & Mosconi, M. W. (2015). Individuals with autism spectrum disorder show abnormalities during initial and subsequent phases of precision gripping. *Journal of neurophysiology*, 113(7), 1989-2001.
- Werling, D. M. (2016). The role of sex-differential biology in risk for autism spectrum disorder. *Biology of Sex Differences*, 7(1), 58. doi:[10.1186/s13293-016-0112-8](https://doi.org/10.1186/s13293-016-0112-8)
- Whyatt, C., & Craig, C. (2013). Sensory-motor problems in Autism. *Front Integr Neurosci*, 7, 51. doi:[10.3389/fnint.2013.00051](https://doi.org/10.3389/fnint.2013.00051)
- Williams, D., & Happé, F. (2009). Pre-Conceptual Aspects of Self-Awareness in Autism Spectrum Disorder: The Case of Action-Monitoring. *Journal of autism and developmental disorders*, 39(2), 251-259. doi:[10.1007/s10803-008-0619-x](https://doi.org/10.1007/s10803-008-0619-x)
- Williams, J. H. G., Waiter, G. D., Gilchrist, A., Perrett, D. I., Murray, A. D., & Whiten, A. (2006). Neural mechanisms of imitation and ‘mirror neuron’ functioning in autistic spectrum disorder. *Neuropsychologia*, 44(4), 610-621. doi:<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2005.06.010>
- Wilson, R. B., Enticott, P. G., & Rinehart, N. J. (2018). Motor development and delay: advances in assessment of motor skills in autism spectrum disorders. *Current Opinion in Neurology*, 31(2), 134-139. doi:[10.1097/WCO.0000000000000541](https://doi.org/10.1097/WCO.0000000000000541)

- Wimmer, H., & Perner, J. (1983). Beliefs about beliefs: Representation and constraining function of wrong beliefs in young children's understanding of deception. *Cognition*, 13(1), 103-128.
- Wolpert, D. M., & Ghahramani, Z. (2000). Computational principles of movement neuroscience. *nature neuroscience*, 3, 1212-1217.
- Woodbury-Smith, M., & Scherer, S. W. (2018). Progress in the genetics of autism spectrum disorder. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 60(5), 445-451. doi:<https://doi.org/10.1111/dmcn.13717>
- Wu, S., Wu, F., Ding, Y., Hou, J., Bi, J., & Zhang, Z. (2017). Advanced parental age and autism risk in children: a systematic review and meta-analysis. *Acta Psychiatr Scand*, 135(1), 29-41. doi:10.1111/acps.12666
- Yates, L., & Hobson, H. (2020). Continuing to look in the mirror: A review of neuroscientific evidence for the broken mirror hypothesis, EP-M model and STORM model of autism spectrum conditions. *Autism*, 24(8), 1945-1959. doi:10.1177/1362361320936945
- Zalla, T., Miele, D., Leboyer, M., & Metcalfe, J. (2015). Metacognition of agency and theory of mind in adults with high functioning autism. *Consciousness and cognition*, 31, 126-138.
- Zalla, T., & Sperduti, M. (2015). The sense of agency in autism spectrum disorders: a dissociation between prospective and retrospective mechanisms? *Frontiers in psychology*, 6.
- Zappella, M., Einspieler, C., Bartl-Pokorny, K. D., Krieber, M., Coleman, M., Bölte, S., & Marschik, P. B. (2015). What do home videos tell us about early motor and socio-communicative behaviours in children with autistic features during the second year of life — An exploratory study. *Early Human Development*, 91(10), 569-575. doi:<https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2015.07.006>
- Zarrei, M., MacDonald, J. R., Merico, D., & Scherer, S. W. (2015). A copy number variation map of the human genome. *Nature Reviews Genetics*, 16(3), 172-183. doi:10.1038/nrg3871
- Zhou, H., Xu, X., Yan, W., Zou, X., Wu, L., Luo, X., . . . Team, L.-N. S. (2020). Prevalence of Autism Spectrum Disorder in China: A Nationwide Multi-center Population-based Study Among Children Aged 6 to 12 Years. *Neuroscience Bulletin*, 36(9), 961-971. doi:10.1007/s12264-020-00530-6

