



HAL
open science

Multisensorialité et mouvement en profondeur dans le continuum autistique : étude comportementale et neurophysiologique

Rachel Poulain

► **To cite this version:**

Rachel Poulain. Multisensorialité et mouvement en profondeur dans le continuum autistique : étude comportementale et neurophysiologique. Neurosciences. Université Toulouse le Mirail - Toulouse II, 2023. Français. NNT : 2023TOU20039 . tel-04219404

HAL Id: tel-04219404

<https://theses.hal.science/tel-04219404v1>

Submitted on 27 Sep 2023

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

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



THÈSE

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

Délivré par l'Université Toulouse 2 - Jean Jaurès

Présentée et soutenue par

Rachel POULAIN

Le 8 septembre 2023

**Multisensorialité et Mouvement en Profondeur dans le Continuum
Autistique : Etude Comportementale et Neurophysiologique**

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

Spécialité : **Neurosciences**

Unité de recherche :

**CERPPS -Centre d'Etudes et de Recherches en Psychopathologie et
Psychologie de la Santé**

Thèse dirigée par

Magali BATTY et Céline CAPPE

Jury

M. Olivier COLLIGNON, Rapporteur

Mme Christina SCHMITZ, Rapporteur

Mme Marianne LATINUS, Examinatrice

M. Bruno GEPNER, Examineur

Mme Magali BATTY, Directrice de thèse

Mme Céline CAPPE, Co-directrice de thèse

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier Olivier Collignon, Christina Schmitz, Marianne Latinus et Bruno Gepner d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse. Votre expertise sur l'autisme et/ou sur le traitement sensoriel ne pourra qu'entraîner d'enrichissants échanges.

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes, quel que soit notre lien, qui ont à leur niveau contribué à mon doctorat et plus largement, à la personne que je suis aujourd'hui.

Je remercie les membres étudiants, chercheurs et ingénieurs des laboratoires CERPPS et CERCO qui ont contribué de près ou de loin au travail de cette thèse. Merci aux membres du bureau 107, Anne-Laure et Vanessa pour votre présence et pour l'ensemble de nos discussions qui m'ont apporté du baume au cœur quand j'en avais besoin.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes codirectrices de thèse, Magali Batty et Céline Cappe. L'opportunité de prendre part à cette aventure multisensorielle n'aurait pas été possible sans votre soutien et pour cela, je vous en suis très reconnaissante. Merci Magali pour tes minutieuses relectures et pour nos discussions riches sur l'autisme, je me retrouve nourrie d'une littérature passionnante.

Merci Céline d'avoir partagé ton intérêt pour l'intégration multisensorielle. Je te remercie d'avoir été à l'écoute quand j'avais le cœur lourd et de m'avoir donné l'opportunité de travailler sur de fabuleux projets annexes.

Durant ces trois années, j'ai beaucoup appris, tant sur moi-même que sur le plan scientifique et je vous remercie de m'avoir accompagnée dans cette étape clé.

Merci aux participants adolescents, adultes, parents, qui ont pris part à ce projet de thèse. Je les remercie pour leur temps et pour les échanges qui m'ont parfois profondément touchée.

Merci à mes ami(e)s pour me rappeler à l'essentiel, de comprendre mes choix de vie et d'être disponibles quand j'en ai besoin. Je remercie ma famille d'avoir toujours su me donner la liberté d'entretenir mes passions, de me donner un amour constant, notamment durant ces longues années d'études qui ne font pourtant que commencer... Merci d'être là, quel que soit l'endroit où vous êtes.

Je dois également beaucoup à Mario. Je te remercie de partager autant avec moi. Tu es inspirant et la plus belle des rencontres que j'ai pu faire.

Résumé de la recherche

Le fonctionnement sensoriel nous permet d'interagir avec le monde extérieur, il est ainsi étroitement lié au développement de fonctions plus complexes notamment cognitives ou sociales. Le Trouble du Spectre de l'Autisme (TSA) se caractérise par des difficultés dans les interactions sociales, la présence de comportements stéréotypés et plus récemment, par des particularités sensorielles qui s'expriment généralement par des hypo/hypersensibilités sensorielles. Puisque la sensorialité des sujets TSA pourrait contribuer à l'intensité, voire à l'émergence de la symptomatologie autistique, une littérature grandissante y perçoit un potentiel étiologique. Ces particularités sensorielles ont été essentiellement caractérisées à partir d'informations unisensorielles (e.g., visuelles ou auditives). Cependant, les informations qui nous entourent impliquent généralement plus d'une modalité sensorielle à la fois et sont rarement statiques. Ainsi, une attention particulière est à allouer à la manière dont les sujets TSA intègrent des informations multisensorielles (e.g., audiovisuelles) en mouvement. Nous avons plus particulièrement choisi d'étudier le mouvement en profondeur (en approche et en éloignement). Celui-ci permet notamment d'éviter une menace, de poursuivre une cible et tient un rôle important dans nos interactions sociales (e.g., s'approcher pour interagir). En outre, le modèle dimensionnel appliqué au TSA propose une extension du spectre dans la population générale, qui s'exprime par des traits de personnalité autistique. Ainsi, tout individu TSA et non-TSA se placerait sur une distribution/un continuum de traits autistiques.

Ainsi, l'objectif de la présente thèse était de caractériser, sur la base d'indicateurs comportementaux et cérébraux, l'intégration multisensorielle (IMS) de mouvement en profondeur tout au long du continuum autistique (dans la personnalité autistique et dans le TSA). Afin de contrôler la composante sociale, des stimuli non sociaux ont été utilisés.

Les données comportementales ont révélé davantage d'indices d'IMS dans le groupe à personnalité autistique élevée et dans le groupe TSA, ce qui suggérerait des mécanismes d'IMS communs à ces deux groupes. Toutefois, des comportements d'hyperréactivité face au mouvement audiovisuel ont été retrouvés spécifiquement dans la personnalité autistique élevée comparativement aux sujets à faible personnalité autistique. Cette hyperréactivité n'a pas été retrouvée dans le TSA, laissant ainsi entrevoir que certains processus ne s'exprimeraient pas de façon linéaire le long du continuum. Les données neurophysiologiques ont révélé des différences intergroupes au niveau des composantes unisensorielles reflétant des niveaux précoces de traitement de l'information. Concernant l'IMS, des différences dès 50 ms post-stimulus ont été mises en évidence ainsi qu'un réseau de l'IMS moins étendu chez les sujets

ayant une personnalité autistique élevée comparativement aux sujets ayant une faible personnalité autistique.

Les résultats de la présente thèse suggèrent ainsi des particularités dès les premières étapes de traitement de l'information uni et multisensorielle pour l'ensemble du continuum autistique. Ce travail de thèse étaye les théories grandissantes proposant un rôle crucial du fonctionnement sensoriel dans le continuum autistique et marque l'ouverture d'un débat concernant l'application du modèle dimensionnel au TSA.

TABLE DES MATIERES

1	PARTIE 1 – INTRODUCTION	1
1.1	Le continuum autistique : une étendue de particularités	2
1.1.1	Description clinique	2
1.1.2	Du trait au trouble	7
1.1.3	Particularités sensorielles dans le TSA	10
1.1.4	Particularités autistiques : une cause sensorielle ?	15
1.1.5	Résumé	22
1.2	Vers une approche écologique du TSA : La multisensorialité et le mouvement	23
1.2.1	L'intégration multisensorielle (IMS) au niveau comportemental	24
1.2.2	L'IMS et le mouvement : des interactions spécifiques ?	31
1.2.3	Développement de l'IMS	36
1.2.4	Le TSA et l'intégration multisensorielle	40
1.2.5	Résumé	47
1.3	Apports de la neurophysiologie	48
1.3.1	La neurophysiologie et l'intégration multisensorielle	48
1.3.2	Corrélat neuronaux de l'IMS du mouvement en profondeur	59
1.3.3	Les données neurophysiologiques de l'intégration multisensorielle dans le TSA	61
1.3.4	Résumé	63
1.4	Synthèse et objectifs	64
2	PARTIE 2 – CONTRIBUTIONS EXPERIMENTALES	67
2.1	Etudes comportementales	68
2.1.1	Etude 1	68
	<i>What makes the detection of movement different within the autistic traits spectrum?</i> <i>Evidence from the audiovisual depth paradigm</i>	68
2.1.2	Etude 2	105
	<i>Etude en cours : extension de l'étude du continuum autistique au TSA</i>	105
2.2	Etude neurophysiologique	126
2.2.1	Etude 3	126
	<i>Does it move? The Multisensory Integration of Depth Movements in the Autistic Personality: Insights from Neural Correlates</i>	126

3	PARTIE 3 – DISCUSSION GENERALE.....	167
3.1	Notion de spectre(s) : entre personnalité et condition clinique.....	167
3.2	Le lien entre fonctionnement sensoriel et social	171
3.3	Espace péripersonnel et mouvement en profondeur dans le TSA	173
3.4	Remédiation temporo-spatiale de l’information multisensorielle dans le TSA.....	176
3.5	Limites et perspectives	176
4	ANNEXE.....	184
4.1	Un spectre de théories pour un spectre de l’autisme	184
4.2	Real-life vs. Online social skills in ASD.....	185
5	REFERENCES.....	198

Liste des figures

Figure 1. Recherche Pubmed « autism ».....	1
Figure 2. Distribution des traits autistiques.....	8
Figure 3. Caractéristiques des traits autistiques selon les groupes.....	9
Figure 4. La pyramide des apprentissages.....	19
Figure 5. Désordre du traitement temporospatial des flux multisensoriels.....	21
Figure 6. L'intégration multisensorielle améliore les performances.....	27
Figure 7. Modèle de la course.....	28
Figure 8. Calcul de l'inégalité de Miller.....	29
Figure 9. Le mouvement multisensoriel en approche.....	35
Figure 10. Violation du modèle de la course selon différents groupes d'âge.....	37
Figure 11. Inégalités de Miller pour les sujets contrôles et TSA.....	43
Figure 12. Zones cérébrales identifiées comme étant multisensorielles.....	49
Figure 13. Les connexions cortico-corticales de l'intégration multisensorielle.....	51
Figure 14. L'électro-encéphalographie.....	53
Figure 15. De l'enregistrement des signaux EEG au calcul des ERPs.....	55
Figure 16. Intégration multisensorielle et mouvement audiovisuel en approche.....	60
Figure 17. [Etude 1] Experimental stimuli.....	77
Figure 18. [Etude 1] Experimental paradigm.....	78
Figure 19. [Etude 1] Correlation representation between the AQ and the AASP.....	82
Figure 20. [Etude 1] Accuracy and RTs across AQ groups and sensory modalities.....	83
Figure 21. [Etude 1] Mean of RTs in movement conditions across sensory modalities.....	86
Figure 22. [Etude 1] Results of Miller's race model inequality.....	87
Figure 23. [Etude 2] Taux de réponses correctes et TR selon le AQ et dans le TSA.....	109
Figure 24. [Etude 2] TR dans les modalités sensorielles pour chacun des groupes.....	111
Figure 25. [Etude 2] Moyenne des TR dans les conditions en mouvement.....	113
Figure 26. [Etude 2] Analyse du modèle de la course.....	115
Figure 27. [Etude 3] The visual, auditory and audiovisual experimental stimuli.....	134
Figure 28. [Etude 3] Behavioral responses across AQ groups and sensory modalities.....	141
Figure 29. [Etude 3] Visual ERPs.....	143
Figure 30. [Etude 3] Auditory ERPs.....	144
Figure 31. [Etude 3] SCP on the overall sample.....	145
Figure 32. [Etude 3] Spatiotemporal windows of MSI over frontal channels.....	147
Figure 33. [Etude 3] Spatiotemporal windows of MSI over parieto-occipital channels.....	148
Figure 34. [Etude 3] Topographical analysis of multisensory integration.....	149
Figure 35. Proposition de modèles pour le continuum autistique.....	170
Figure 36. Espace péripersonnel.....	175
Figure 37. Effet de l'entraînement sur les caractéristiques de la fenêtre d'IMS.....	177
Figure 38. Expérience additionnelle de Cappe et al. (2009).....	179
Figure 39. Schéma des principales théories sur le TSA.....	184
Figure 40. Relation between autistic traits and social skills.....	192

Liste des tables

Table 1. Critères diagnostiques du TSA issus du DSM-5	4
Table 2. Liste des comorbidités dans le TSA	6
Table 3. Exemples de particularités sensorielles dans le TSA	11
Table 4. [Etude 1] Generalized linear mixed-effects models	80
Table 5. [Etude 1] Pearson correlation matrix between the AQ and the AASP	102
Table 6. [Etude 1] Correlation analysis between the RTs and the AQ.....	104
Table 7. [Etude 2] Description des participants	107
Table 8. [Etude 3] Unisensory ERPs.	138
Table 9. [Etude 3] Spatiotemporal windows of multisensory integration.....	146
Table 10. Means, SDs and ranges of the questionnaires	190
Table 11. Pearson correlation matrix between the questionnaires	191

Liste des acronymes et des abréviations

A	Auditory – Auditif
AQ+	Autism Quotient high – Traits Autistiques Elevés (TAE)
AQ-	Autism Quotient low – Traits Autistiques Faibles (TAF)
ASD	Autism Spectrum Disorder – Trouble du Spectre de l’Autisme (TSA)
AV	Audiovisual – Audiovisuel
CP	Cumulative Probability – Probabilité cumulée
%CR	Rate of correct responses – Taux de réponses correctes (%RC)
EEG	Electro-encephalography – Electro-encéphalographie
fMRI	Functional Magnetic Resonance Imaging – Imagerie à Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf)
MMN	Mismatch Negativity
MSI	Multisensory integration – Intégration multisensorielle (IMS)
PPS	Peripersonal space – espace péripersonnel
RT	Reaction Times – Temps de réaction (TR)
TBW	Temporal Binding Window – Fenêtre d’intégration multisensorielle
TOM	Theory Of Mind – Théorie de l’esprit
V	Visual – Visuel

1 PARTIE 1 – INTRODUCTION

Autisme, Trouble envahissant du développement, Trouble du Spectre de l'Autisme. De quoi parlons-nous ? La réponse demeure incomplète. Partons de la dernière version du manuel Diagnostique et Statistique des troubles Mentaux pour nous accorder sur un trouble du neurodéveloppement, le Trouble du Spectre de l'Autisme (TSA). Comme c'est le cas pour de nombreux domaines, le TSA a connu un intérêt grandissant depuis les années 2000 (voir Fig. 1). Malgré l'accumulation de données empiriques, notre compréhension du trouble n'est toujours pas à la hauteur des efforts scientifiques fournis : L'origine stricte du TSA reste indéfinie et les symptômes disparates d'un individu à un autre (ou au sein du même individu), rendent difficile l'homogénéisation des résultats scientifiques.

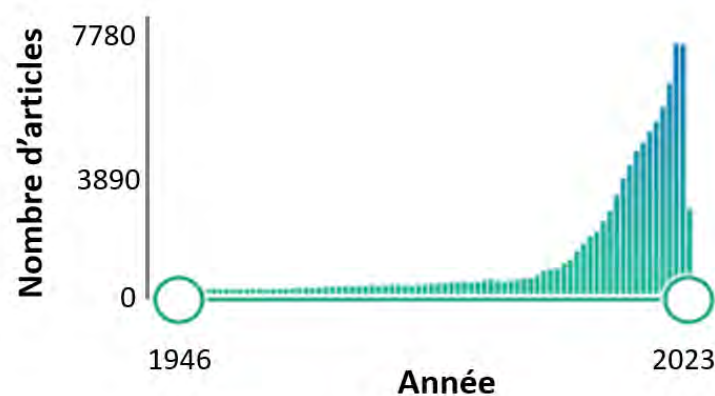


Figure 1. Recherche Pubmed "Autism"

Néanmoins, les scientifiques/cliniciens s'accordent sur des difficultés d'ordre social et comportemental. Depuis 2013, le diagnostic du TSA s'est vu enrichir d'un nouveau critère : la sensorialité. Observés depuis toujours, les comportements d'évitement sensoriel, la recherche de sensation, hypo/hypersensibilité sensorielle sont aujourd'hui considérés comme un critère diagnostique à part entière. S'il convient de penser que le nourrisson apprend à partir de ses sens, comment peut-il correctement apprendre si ses sens ne lui transmettent pas le bon signal ? Un récent champ de recherche qui continue à se répandre, propose un effet en cascade de cette atteinte sensorielle sur l'ensemble du fonctionnement de la personne TSA. Il nous a fait sens de contribuer à ce champ de recherche, en développant le sujet de la présente thèse qui contribuera, à son échelle, à définir les particularités sensorielles au sein du spectre de l'autisme.

1.1 Le continuum autistique : une étendue de particularités

1.1.1 Description clinique

« Autisme » vient du grec *autos* qui signifie « soi-même ». Ce terme est d'abord utilisé par Bleuler (1911) qui considère l'autisme comme l'un des trois symptômes de la schizophrénie, avec la dissociation et l'ambivalence. Bleuler décrit ses patients comme étant repliés sur eux-mêmes, en rupture avec le réel. Ce terme est repris par le pédopsychiatre Kanner (1943) qui définit l'autisme non pas comme un symptôme de la schizophrénie mais comme une condition à part entière. Il décrit ainsi 11 cas d'autisme infantile ayant des profils hétérogènes, notamment en termes de capacités cognitives et langagières, suggérant déjà l'idée d'un « spectre » de l'autisme. Malgré cette hétérogénéité, il décrit un noyau central qui s'articule autour d'atypies des interactions sociales et de la communication (« aloneness ») ainsi que des comportements, activités et intérêts répétitifs (« sameness »). Cette dyade de difficultés est encore d'actualité et se retrouve dans les critères diagnostiques de la dernière version du manuel Diagnostique et Statistique des troubles Mentaux (DSM-5; APA, 2013). Selon celle-ci, l'autisme est aujourd'hui considéré comme un trouble du développement cérébral, donc d'apparition précoce, classé comme « Trouble du Spectre de l'Autisme » (TSA). Plus précisément, bien qu'aucune étiologie et marqueur biologique spécifique n'aient été à ce jour décrits (London, 2014), un certain nombre d'anomalies neuro-anatomiques et neurofonctionnelles ont été rapportées dans le TSA (voir la revue de Donovan & Basson, 2017). Un des résultats communément associés au TSA est l'augmentation du périmètre crânien chez les enfants, qui a été décrit très tôt dans la littérature (Kanner, 1943). En effet, de nombreuses études ont contribué à mettre en évidence une augmentation volumétrique de l'amygdale (Mosconi et al., 2009; Munson et al., 2006) et du cortex frontal (Courchesne, Campbell, et al., 2011; Courchesne, Mouton, et al., 2011) chez des nourrissons ultérieurement diagnostiqués avec un TSA, qui paraît diminuer, voire se normaliser au cours du développement (Schumann et al., 2004; Zielinski et al., 2014). Il existe également des preuves d'augmentation de volume concernant les lobes occipitaux et temporaux ainsi que des régions sous-corticales telles que l'hippocampe (voir les revues de Anagnostou & Taylor, 2011; Haar et al., 2016). En outre, l'augmentation du volume du cervelet ainsi que l'hypoplasie des lobules cérébelleux médio-postérieurs (VI+VII) ont été les premiers changements neuro-anatomiques détectés dans le TSA (Courchesne et al., 1988). Depuis, de nombreuses études ont rapporté des anomalies cérébelleuses (voir la revue de Becker & Stoodley, 2013), telle qu'une diminution substantielle de la taille et du nombre de cellules de Purkinje aujourd'hui bien caractérisée (e.g., Fatemi et al., 2012; Lucci, 2018; Tsai et al., 2012). D'ailleurs, une réduction du volume du corps calleux a également été retrouvée (Frazier & Hardan, 2009), mettant en

évidence une atteinte de la connectivité cérébrale dans le TSA. D'autres régions corticales et sous-corticales ont également été décrites comme atypiques tant au niveau de leur épaisseur corticale, que de leur organisation en micro-colonne ou de leur connectivité (Casanova et al., 2006; Just, 2004). Malgré des décennies de recherche neuroscientifique, le diagnostic du TSA est entièrement basé sur des manifestations comportementales. Plus précisément, le DSM-5 propose de prendre appui sur une dyade de symptômes autistiques : 1) Déficits persistants dans la communication sociale et l'interaction sociale dans de multiples contextes, et 2) Comportements, activités ou intérêts répétitifs et/ou restreints (voir Table 1). Les atteintes socio-communicatives dans le TSA peuvent affecter aussi bien les capacités verbales que non verbales. Plus concrètement, un comportement oculaire atypique (e.g., diminution du contact visuel), une réciprocité sociale ou émotionnelle appauvrie (e.g., expression faciale inappropriée au contexte) ainsi que des difficultés à partager des intérêts (absence d'indication par pointage des objets d'intérêts) permettent d'illustrer les nombreux comportements non verbaux inadaptes qu'il est possible de retrouver dans le TSA. Les difficultés sociales dans le domaine verbal peuvent se caractériser par un retard/absence du langage, ou paradoxalement, des capacités langagières précoces. Chez les sujets ayant développé des compétences verbales, l'intonation, la structure grammaticale ou encore le rythme peuvent être inhabituels. Les sujets peuvent également éprouver des difficultés à comprendre des aspects non littéraux du langage comme l'humour et l'ironie (APA, 2013).

Un deuxième axe de symptômes concerne les comportements, activités et intérêts répétitifs ainsi que stéréotypés. Ils se manifestent généralement par une insistance sur la similitude, une adhérence excessive aux routines associée à une résistance au changement. Les sujets avec un TSA présentent des intérêts restreints et atypiques dans leur contenu et/ou leur intensité. Enfin, les comportements sensoriels inhabituels font partie intégrante des critères diagnostiques du TSA depuis 2013 (APA, 2013). Pouvant toucher toutes les modalités sensorielles, ils se divisent en trois catégories principales ; une hypersensibilité sensorielle (hyperréactivité à des stimuli), une hyposensibilité sensorielle (diminution/absence de réponse à certains stimuli) et une recherche de stimulation (e.g., autostimulation) (Baranek et al., 2006).

Table 1. Critères diagnostiques du TSA issus du DSM-5

<p>A. Persistent deficits in social communication and social interaction across multiple contexts, as manifested by the following, currently or by history (examples are illustrative, not exhaustive; see text):</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Deficits in social-emotional reciprocity, ranging, for example, from abnormal social approach and failure of normal back-and-forth conversation; to reduced sharing of interests, emotions, or affect; to failure to initiate or respond to social interactions. 2. Deficits in nonverbal communicative behaviors used for social interaction, ranging, for example, from poorly integrated verbal and nonverbal communication; to abnormalities in eye contact and body language or deficits in understanding and use of gestures; to a total lack of facial expressions and nonverbal communication. 3. Deficits in developing, maintaining, and understand relationships, ranging, for example, from difficulties adjusting behavior to suit various social contexts; to difficulties in sharing imaginative play or in making friends; to absence of interest in peers.
<p>B. Restricted, repetitive patterns of behavior, interests, or activities, as manifested by at least two of the following, currently or by history (examples are illustrative, not exhaustive; see text):</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Stereotyped or repetitive motor movements, use of objects, or speech (e.g., simple motor stereotypes, lining up toys or flipping objects, echolalia, idiosyncratic phrases). 2. Insistence on sameness, inflexible adherence to routines, or ritualized patterns of verbal or nonverbal behavior (e.g., extreme distress at small changes, difficulties with transitions, rigid thinking patterns, greeting rituals, need to take same route or eat same food every day). 3. Highly restricted, fixated interests that are abnormal in intensity or focus (e.g., strong attachment to or preoccupation with unusual objects, excessively circumscribed or perseverative interests). 4. Hyper- or hyporeactivity to sensory input or unusual interest in sensory aspects of the environment (e.g. apparent indifference to pain/temperature, adverse response to specific sounds or textures, excessive smelling or touching of objects, visual fascination with lights or movement).
<p>C. Symptoms must be present in the early developmental period (but may not become fully manifest until social demands exceed limited capacities, or may be masked by learned strategies in later life).</p>
<p>D. Symptoms cause clinically significant impairment in social, occupational, or other important areas of current functioning.</p>
<p>E. These disturbances are not better explained by intellectual disability (intellectual developmental disorder) or global developmental delay. Intellectual disability and autism spectrum disorder frequently co-occur; to make comorbid diagnoses of autism spectrum disorder and intellectual disability, social communication should be below that expected for general developmental level.</p>

Il n'existe pas un autisme mais des autismes dont la sévérité peut varier considérablement d'un bout à l'autre du spectre. Il s'agit en effet d'une condition qui est caractérisée par une très forte hétérogénéité, tant d'un point de vue génotypique que phénotypique (Chang et al., 2015; Eapen & Clarke, 2014). L'hétérogénéité du TSA peut être d'abord appréhendée à partir du DSM-IV (APA, 1994) qui classe les « Troubles envahissants du développement » en cinq catégories : troubles autistiques, syndrome d'Asperger, trouble désintégratif de l'enfance, troubles envahissants du développement non spécifiés, syndrome de Rett, chacune ayant ses propres spécificités phénotypiques mais manifestant des difficultés centrées autour de la communication et des interactions sociales ainsi que des comportements répétitifs et des intérêts restreints. En effet, aujourd'hui ces catégories à l'exception du syndrome de Rett, se rassemblent sous la notion de « TSA », illustrant l'utilisation du terme « Spectre » dans ce dernier. Nous retrouvons une hétérogénéité au niveau des deux axes diagnostiques du DSM-5 (voir Table 1). La typologie sociale proposée par Lorna Wing pour les autistes, à savoir "distants, passifs et actifs, mais pas trop", peut être considérée comme une première tentative de considérer les difficultés sociales dont les manifestations varient considérablement (Wing & Gould, 1979). Par exemple, alors que 50 % des personnes avec un TSA ne développent pas de capacités verbales fonctionnelles, d'autres peuvent présenter une maîtrise exceptionnelle du langage au niveau formel, avec cependant de grandes difficultés dans son utilisation pragmatique (Tager-Flusberg & Caronna, 2007). Concernant le deuxième axe du diagnostic, les manifestations des symptômes comportementaux ont été décrites avec une sévérité et des caractéristiques très variables (Kim et al., 2016; Ring et al., 2008; Wiggins et al., 2012). Nous pouvons par exemple mentionner la « sensibilité inhabituelle aux stimuli sensoriels » (APA, 2013) s'exprimant autant par des hypersensibilités que des hyposensibilités sensorielles et pouvant varier d'une modalité sensorielle à l'autre chez un même individu (Marco et al., 2011; Robertson & Baron-Cohen, 2017a; Tomchek & Dunn, 2007; Van Etten et al., 2017). Nous aborderons les particularités sensorielles liées au TSA dans la section 1.1.3. Un autre phénomène permettant d'illustrer l'hétérogénéité des symptômes dans le TSA est la variabilité de l'âge auquel les personnes sont diagnostiquées : allant de quelques mois après la naissance à la vie adulte, justifiant l'organisation des services spécialisés dans le diagnostic de TSA en tranche d'âge. De plus, de multiples comorbidités ont été signalées dans le TSA, notamment des troubles du développement intellectuel, des troubles du langage, des troubles du déficit de l'attention avec/sans hyperactivité (TDAH), des comportements involontaires ou obsessionnels compulsifs, des troubles du sommeil ou des troubles de l'alimentation (Lai et al., 2014; Leyfer

et al., 2006; McCary & Roberts, 2013). Une liste des comorbidités fréquemment signalées dans le TSA est présentée dans la Table 2.

Table 2. Liste des comorbidités dans le TSA (adaptée de *Lai et al., 2014*)

Developmental	
Intellectual disability	45 %
Language disorders	Variable
Attention-deficit hyperactivity disorder	28-44 %
Tic disorders	14-38 %
Motor abnormality	≤79 %
General medical	
Epilepsy	8-30 %
Gastrointestinal problems	9-70 %
Immune dysregulation	≤38 %
Genetic syndromes	~5 %
Sleep disorders	50-80 %
Psychiatric	
Anxiety	42-56 %
Depression	12-70 %
Obsessive-compulsive disorder	7-24 %
Psychotic disorders	12-17 %
Substance use disorders	≤16 %
Oppositional defiant disorder	16-28 %
Eating disorders	4-5 %

Cette « constellation » des profils autistiques (Gepner, 2006) impacte la répliquabilité des résultats des études scientifiques et entraîne des incohérences dans ces derniers, soulignées dans de nombreuses méta-analyses (pour une revue des méta-analyses voir Jumah et al., 2016). Caractériser le plus précisément possible le profil autistique de l'échantillon étudié afin de mener des études comparatives à partir d'un groupe TSA homogène et/ou appliquer une approche dimensionnelle en associant le profil autistique à la mesure expérimentale pourraient contribuer à rétablir une cohérence des données empiriques. Ce travail de thèse s'est employé à appliquer de telles méthodes.

1.1.2 Du trait au trouble

Des études familiales, cliniques et épidémiologiques ont suggéré que le TSA représente l'extrémité supérieure d'une constellation de déficits sociaux et non-sociaux qui peuvent être distribués de manière continue par nature. Ainsi, en tant que trouble d'un spectre, les traits spécifiques associés au TSA ne se retrouveraient pas seulement chez les personnes ayant un diagnostic clinique mais également dans la population générale (e.g., Constantino et al., 2000; Piven et al., 1997; Spiker et al., 2002).

La mise en évidence d'un tel continuum autistique (voir Figure 2) provient d'études explorant la part de la génétique dans le TSA en comparant les traits phénotypiques d'enfants TSA et ceux des autres membres de leur famille. L'évaluation des caractéristiques autistiques à partir d'outils diagnostiques chez la famille des sujets TSA a mis en évidence une expression croissante des traits autistiques selon les groupes : plus faible dans le groupe contrôle, plus importante chez la famille de sujets TSA mais ne répondant pas aux critères diagnostiques pour ces deux groupes et enfin beaucoup plus élevée chez les sujets TSA. Ces résultats mettent déjà en évidence l'existence d'un continuum autistique ou appelé le *broader autism phenotype* (Bailey et al., 1995; Folstein & Rutter, 1977; Wing, 1988). Il existerait donc un continuum de traits autistiques sur lequel se distribue l'ensemble de la population, générale ou clinique, dont l'extrémité serait composée de personnes TSA. En considérant l'administration longue et coûteuse des instruments diagnostiques, des outils psychométriques courts et auto-administrés ont été développés afin d'évaluer le profil autistique de tout individu ne présentant pas de retard intellectuel, tel que le *Autism spectrum Quotient* (AQ, Baron-Cohen et al., 2001) qui est largement utilisé dans la littérature.

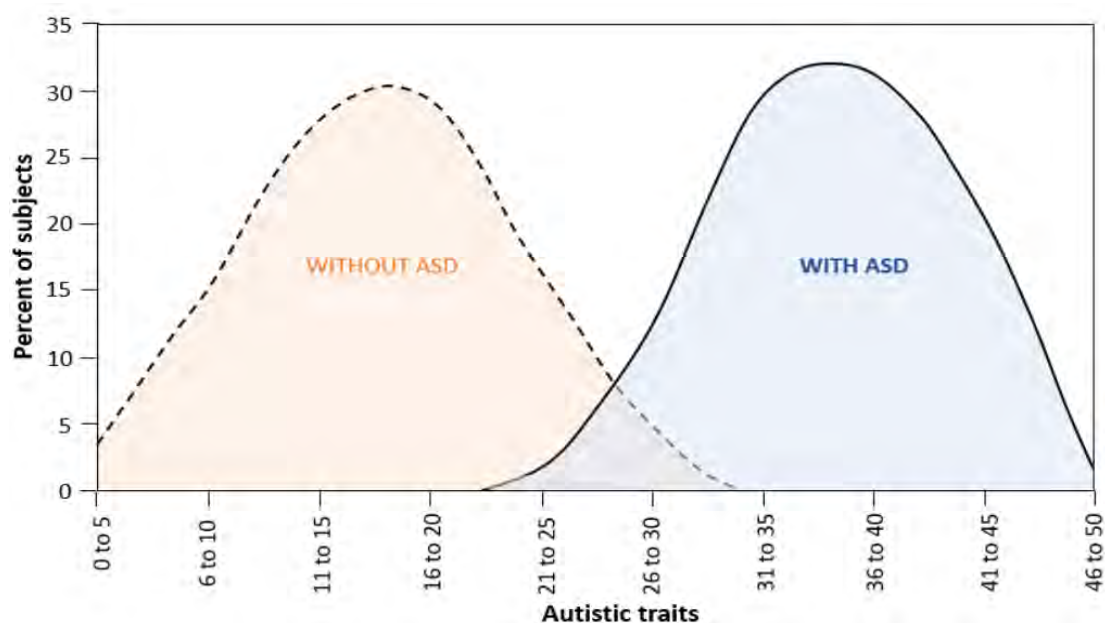


Figure 2. Distribution des traits autistiques dans la population générale (en orange) et dans le TSA (en bleu), adaptée de *Baron-Cohen et al. (2001)*.

Nombreuses sont les dimensions étudiées selon le degré de traits autistiques chez les sujets TSA et issus de la population générale. Les études mettent en évidence une expression croissante des difficultés/spécificités explorées selon le degré de traits autistiques et en général, des similarités sont mises en évidence entre les personnes ayant des Traits de personnalité Autistique Elevés (TAE) et les sujets TSA. Ces similarités concernent les deux axes symptomatologiques du TSA. Ce manuscrit de thèse n'informera pas exhaustivement des similitudes retrouvées entre les sujets TSA et les sujets non-TSA présentant des traits autistiques élevés mais en fera une description sur les principaux aspects. Le premier axe relève des difficultés dans le domaine social. Il a été communément retrouvé des difficultés d'attribution d'états mentaux (théorie de l'esprit) chez les sujets TAE et TSA (e.g., Baksh et al., 2018; Stewart et al., 2020). En plus d'une cognition sociale diminuée, des difficultés dans la perception auditive de la parole (Stewart & Ota, 2008), une préférence d'orientation du regard vers des images floues plutôt que vers des visages (e.g., Bayliss & Tipper, 2005) ont été retrouvées chez des sujets TAE et TSA. Pour finir, des difficultés socio-communicatives et de réciprocités sociales (e.g., Bezemer et al., 2021; Constantino et al., 2000) ainsi qu'une hypo-activité cérébrale au contact social (Voos et al., 2013) ont été mises en évidence chez ces sujets. Des similitudes entre les sujets TAE et TSA concernant le deuxième axe du diagnostic ont été également proposées et concernent une préférence pour l'aspect prévisible d'informations visuelles et auditives (e.g., Goris et al.,

2020), ce qui fait écho à l'adhésion excessive aux routines communément décrite dans le TSA. Un profil sensoriel similaire (voir Figure 3, e.g., Mayer, 2017; Takayama et al., 2014) et des réponses comportementales aux entrées sensorielles comparables entre les sujets TAE et TSA, quelle que soit la modalité sensorielle, ont été retrouvées (e.g., Clark et al., 2013; Donohue et al., 2012; van Laarhoven et al., 2019; Yaguchi & Hidaka, 2018). Au niveau perceptif, les sujets TAE et TSA présentent des performances élevées dans des tâches d'exploration visuelle telles que les figures enchevêtrées ou les cubes de Kohs (e.g., Grinter, Van Beek, et al., 2009; Shah & Frith, 1983; Stewart et al., 2009). En outre, des études récentes ont fait état d'altérations neurobiologiques, neuroanatomiques et neurofonctionnelles similaires entre les sujets TAE et TSA (e.g., Alemany et al., 2021; Kondo & Lin, 2020; von dem Hagen et al., 2013). Par exemple, une dominance réduite de l'hémisphère gauche (Lindell et al., 2009) et une diminution de la matière blanche dans le sillon temporal supérieur qui est impliqué dans le traitement des stimuli sociaux (von dem Hagen et al., 2011; Zilbovicius et al., 2013), ont été retrouvées. De plus, une récente étude a mis en évidence que les traits autistiques dans la population générale prédisaient le volume de l'amygdale, du cervelet et de l'hippocampe (Nees et al., 2022), régions dans lesquelles des altérations volumétriques ont été communément décrites dans le TSA (voir section 1.1.1).

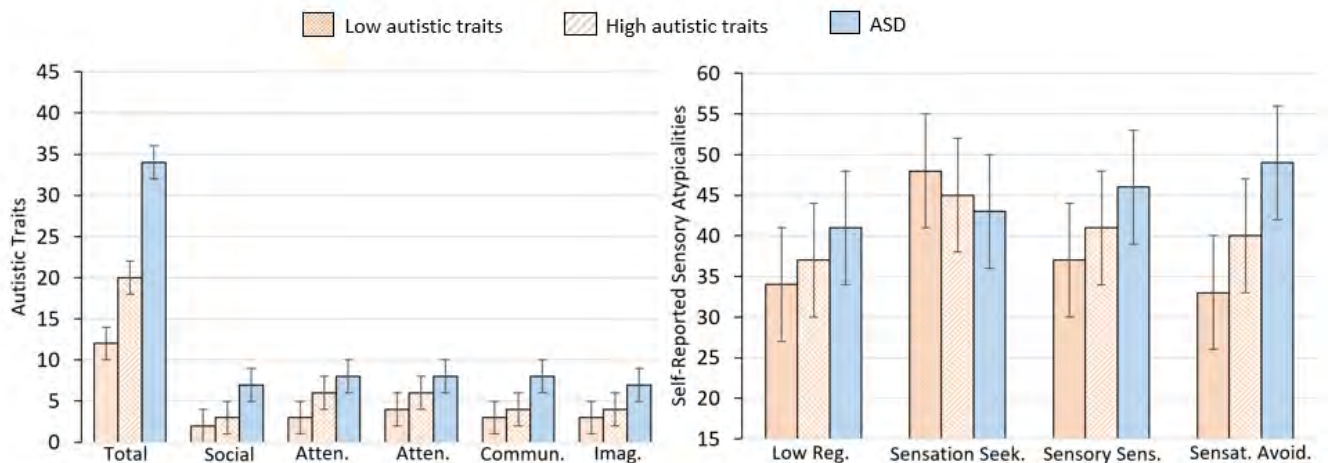


Figure 3. A gauche : Caractéristiques des traits autistiques évalués à partir du AQ selon les groupes (traits autistiques faibles, élevés et dans le TSA, respectivement). A droite : Atypies sensorielles évaluées à partir du profil sensoriel AASP (Brown & Dunn, 2002) selon le degré de traits autistiques (faible, élevé et dans le TSA, respectivement). Adaptée de Mayer, 2017.

1.1.3 Particularités sensorielles dans le TSA

«My bed was surrounded and totally encased by tiny spots which I called stars, like some kind of mystical glass coffin. I have since learned that they are actually air particles yet my vision was so hypersensitive that they often became a hypnotic foreground with the rest of the world fading away».

Donna Williams, p. 15, «Nobody Nowhere» (Williams, 1999).

Kanner (1943) observait déjà des particularités sensorielles s'exprimant par un évitement du regard, une attention inhabituelle aux détails, une aversion pour le mouvement et une réactivité soit trop élevée, soit inexistante aux sons. Il faut attendre trois décennies pour que le fonctionnement sensoriel dans le TSA soit un objet d'étude et les premières théories proposent que le cerveau des enfants TSA n'est pas en capacité d'attribuer des significations aux sensations et de les organiser (Ayres, 1979; Delacato, 1974; Ornitz, 1974). Ayres (1979) introduit les notions de défensivité tactile et de sensibilité excessive pouvant toucher l'ensemble des modalités sensorielles. Concernant la prévalence des désordres sensoriels dans le TSA, bien que les études s'accordent à dire qu'ils soient fréquents, elles expriment un taux de prévalence variable : entre 30% et 100% (Baker et al., 2008; Baranek et al., 2006; Dawson & Watling, 2000) ou autour de 90% (Crane et al., 2009; Leekam et al., 2007; Tomchek & Dunn, 2007). Cette disparité s'explique principalement par des différences méthodologiques entre les recherches, tant du point de vue de la constitution des échantillons que des outils utilisés (Ben-Sasson et al., 2009). En outre, les particularités sensorielles semblent être présentes tout au long de la vie de la personne TSA. Elles sont observables dès la toute petite enfance (Baranek, 1999; Ben-Sasson et al., 2007; Sauvage, 1988; Zwaigenbaum et al., 2005), pendant l'enfance (Ausderau et al., 2014) et à l'âge adulte (Leekam et al., 2007; Tavassoli et al., 2014). Désormais considérées comme un critère de diagnostic (APA, 2013), les particularités sensorielles s'expriment généralement par des hypo- et/ou hyper-réactivités aux stimulations sensorielles, par des intérêts inhabituels pour les aspects sensoriels de l'environnement et par des recherches de sensation (Baranek et al., 2006). De récentes théories proposent que ces particularités sensorielles seraient au cœur des difficultés de fonctionnement des sujets TSA (Chamak et al., 2008; Robertson & Baron-Cohen, 2017a; Thye et al., 2018). Nous reviendrons sur ce point dans la section 1.1.4 de ce manuscrit de thèse.

Comme précédemment mentionné, les particularités sensorielles ont été mises en évidence dans chacune des modalités sensorielles (voir Table 3 ; Ayres, 1979; Posar & Visconti, 2018). Ce travail de thèse se focalisera sur celles retrouvées dans les modalités visuelles et auditives et qui concernent autant les informations statiques, que les informations dynamiques. En considérant l'importance des symptômes dans le domaine social des personnes TSA, de nombreuses études se sont intéressées au traitement sensoriel d'informations sociales dans le TSA, tant au niveau visuel (traitement des visages), qu'au niveau auditif (traitement de la voix). Globalement, les résultats issus de la littérature s'accordent sur un traitement inhabituel de tels stimuli, associé à des corrélats neuronaux différents des sujets contrôles (voir les revues de O'Connor, 2012; Simmons et al., 2009). En considérant le sujet de ce travail de thèse, les résultats issus de la littérature concernant le traitement sensoriel d'informations non-sociales et simples ont été développés ci-dessous.

Table 3. Exemples de particularités sensorielles chez les personnes TSA selon les modalités sensorielles. Adapté de *Posar & Visconti (2018)*.

Sensory modalities	Examples of behaviors related to sensory abnormalities
Visual	<ul style="list-style-type: none"> • Attraction for light sources • Staring at spinning objects such as washing machine centrifuge, wheels, and propeller fans • Impaired recognition of face expressions • Gaze avoidance • Refusal of foods because of their color
Auditory	<ul style="list-style-type: none"> • Apparent deafness: the child does not turn to the verbal call • Intolerance to some sounds, different from case to case • Emission of repetitive sounds
Somatosensory	<ul style="list-style-type: none"> • High pain tolerance • Apparent insensitivity to heat or cold • Self-aggressiveness • Dislike of physical contact, including certain clothing items • Attraction for rough surfaces
Olfactory	<ul style="list-style-type: none"> • Smelling non-edible things • Refusal of certain foods due to their odor
Taste, oral sensitivity	<ul style="list-style-type: none"> • Oral exploration of objects • Food selectivity due to refusal of certain textures
Vestibular	<ul style="list-style-type: none"> • Iterative rocking • Inadequate balance
Proprioceptive/ kinesthetic	<ul style="list-style-type: none"> • Walking on toes • Clumsiness

Au niveau visuel, les comportements sensoriels atypiques comprennent l'autostimulation (par exemple, l'enfant secoue ses mains devant ses yeux). Les enfants TSA peuvent également présenter une fascination pour les lumières ou des regards latéraux inhabituels pour regarder leur périphérie visuelle (Mottron et al., 2007). À l'inverse, ils peuvent présenter des comportements d'évitement des stimulations sensorielles (par exemple, se couvrir les yeux). Au-delà de l'observation clinique, les données empiriques mettent en évidence une perception accrue des détails, en particulier pour les stimuli simples et à l'inverse, des difficultés prononcées dans des tâches plus complexes. Plus précisément, il est communément observé que les sujets TSA présentent des améliorations comportementales lorsqu'ils perçoivent des stimuli sensoriels non-sociaux, mais qu'ils présentent des déficits dans le traitement d'informations sociales (e.g., Bonnel et al., 2003; Mottron et al., 2006).

Au niveau auditif, une hypersensibilité aux sons à haute intensité est communément décrite dans le TSA. Des observations cliniques et des autobiographies précisent que cela concerne particulièrement les sons soudains et inattendus (par exemple, l'aboiement d'un chien), aigus et continus (par exemple, un appareil électrique) ainsi que les combinaisons de sons multiples, comme celles qui se produisent dans les centres commerciaux (Attwood, 1998; Birch, 2003; Grandin, 1995). L'hypersensibilité auditive peut provoquer une grande détresse et une grande anxiété chez les personnes TSA. Par exemple, Grandin (1997) a qualifié de "terrifiant" le bruit d'un sac en papier gonflé qui éclate. De nombreuses études ont étudié ce phénomène d'hypersensibilité et mettent effectivement en évidence un inconfort auditif pour des sons purs à des niveaux sonores significativement inférieurs chez les sujets TSA (Khalfa et al., 2004). Rosenhall et al. (1999) ont constaté que 18 % des enfants TSA présentent une gêne auditive pour les stimuli de type clic à des niveaux d'intensité inférieurs à 80 dBnHL, contre 0 % des enfants contrôles. De plus, une plus faible préférence attentionnelle aux sons dans le TSA a été retrouvée en observant une orientation diminuée de la tête vers une source sonore (e.g., Dawson et al., 1998, 2004). L'hyposensibilité auditive est empiriquement moins décrite dans le TSA et les recherches actuelles considèrent qu'elle se manifeste dans les comportements de recherche de sensations (recherche de bruits forts) ainsi que dans les comportements d'hyporéactivité face à tout type de sons, notamment l'appel du prénom qui fait d'ailleurs partie des signes d'alerte chez le nourrisson de 18 mois (HAS, 2018; Tan et al., 2012; voir la revue de O'Connor, 2012).

Au niveau neurophysiologique, le paradigme oddball a été très utilisé pour étudier le traitement auditif et visuel dans le TSA. Dans celui-ci, des stimuli déviants sont présentés aux participants de manière peu fréquente et irrégulière dans une série de stimuli standards. Globalement, des différences d'amplitude et de latence pour des ondes cérébrales précoces ont été retrouvées entre les sujets TSA et les sujets contrôles aussi bien pour des stimuli visuels qu'auditifs, mettant en évidence une atteinte des premiers stades de traitement de l'information sensorielle. Plus précisément, des valeurs d'amplitude plus faibles et des valeurs de latence plus tardives ont été globalement retrouvées pour les stimuli standards au niveau de P1 et N1 (e.g., Donkers et al., 2020; Sokhadze et al., 2009; Sokhadze et al., 2017; Whitehouse & Bishop, 2008). Des différences entre les sujets TSA et contrôles ont été également retrouvées au niveau de la Mismatch Negativity (MMN), une composante différentielle obtenue par la soustraction des réponses pour les stimuli déviants aux stimuli standards. Les sujets TSA présentent généralement des valeurs d'amplitude plus faibles et des valeurs de latence plus précoces (e.g., Cléry et al., 2013; Gomot et al., 2011; Ruiz-Martínez et al., 2020). Il a ainsi été proposé dans le TSA une sensibilité importante aux changements sensoriels qui pourrait contribuer à l'intolérance au changement ainsi qu'au besoin irrépensible de préserver des schémas de « sameness » (voir section 1.1.1). D'autres paradigmes expérimentaux utilisant une participation passive ou active de détection ont également mis en évidence des différences de latence ou d'amplitude entre les deux groupes, aussi bien au niveau auditif, qu'au niveau visuel en N1 et P1 renforçant l'hypothèse d'atteinte des premiers niveaux de traitement sensoriel de l'information (e.g., Batty et al., 2011; Brandwein et al., 2013; Bruneau et al., 1999, 1999; Kovarski et al., 2016; Orekhova et al., 2009; Sayorwan et al., 2018).

Concernant le traitement d'informations sensorielles dynamiques, des difficultés de discrimination du mouvement ont été retrouvées dans le TSA, que le mouvement soit translationnel, rotationnel ou radial (Bertone et al., 2003). Au niveau du mouvement translationnel (droite ↔ gauche), les études explorant le seuil de cohérence du mouvement ont globalement mis en évidence des seuils plus élevés dans le TSA, signifiant un besoin de cohérence plus important chez les sujets TSA pour discriminer le sens du mouvement (Mestre et al., 2002; Milne et al., 2002, 2006; Pellicano et al., 2005; Robertson et al., 2012; Spencer et al., 2000; Spencer & O'Brien, 2006; Tsermentseli et al., 2008). En outre, la visualisation d'un flux radial peut produire une impression de mouvement qui vient de soi, entraînant des mouvements posturaux compensatoires. Plusieurs études ont noté que les enfants TSA sont moins réactifs à de tels stimuli et que le degré de cette hyporéactivité posturale est en corrélation

avec la sévérité des symptômes (Gepner & Mestre, 2002b; Greffou et al., 2012). Le mouvement biologique représente les actions humaines à l'aide d'affichages de points lumineux en mouvement (Blake & Shiffrar, 2007; Johansson, 1973). Il transmet généralement l'information d'un corps en mouvement de marche pour lequel un regard préférentiel chez de jeunes enfants non-TSA est observé, ce qui n'est pas le cas dans le TSA (Annaz et al., 2012; Falck-Ytter et al., 2013). De plus, la méta-analyse récente de Todorova et al. (2019) sur la base de 52 études a confirmé la présence de difficultés à reconnaître le mouvement biologique dans le TSA, qu'il soit lié à un mouvement de marche, à un mouvement du visage ou des yeux. Centelles et al. (2013) ont étudié les capacités de reconnaissance d'un "mouvement social" qui impliquait une interaction avec d'autres individus (par exemple, jouer au football, se serrer la main), à un "mouvement non social" qui constituait un mouvement humain sans interaction sociale (par exemple, marcher, avancer ou reculer). Les résultats ont révélé des capacités de discrimination plus faibles pour les sujets TSA concernant les scènes sociales et non-sociales. Ainsi, il semble que les sujets TSA perçoivent différemment le mouvement qui transmet des informations sociales, soit directement (mouvement impliquant une interaction sociale), soit indirectement (mouvement impliquant au moins une personne). Selon Centelles et al. (2013), il est probable que la pauvreté des actions réalisées dans un cadre social ou non contribue dans le TSA, aux difficultés de reconnaissance et de compréhension des interactions sociales et non-sociales observées au cours de leur développement jusqu'à l'âge adulte. En outre, des études en neuro-imagerie ont proposé que ces difficultés de reconnaissance du mouvement biologique seraient sous-tendues par un réseau cérébral différent des sujets contrôles. Plus précisément, lorsque l'activité cérébrale est comparée entre un mouvement biologique et un mouvement aléatoire (sans forme particulière), une activité du sulcus temporal supérieur, des ganglions de la base, de l'insula et d'aires corticales pariétales, temporales ainsi que frontales est constatée chez les sujets contrôles pour le mouvement biologique. En revanche, en réponse au mouvement biologique, les sujets TSA présentent une activité cérébrale largement moins étendue et plus faible, qui se concentre principalement dans les aires pariéto-temporales, frontales, dans les ganglions de la base et le thalamus (Freitag et al., 2008). Deux études électrophysiologiques ont été menées dans le TSA. Kröger et al. (2014) ont mis en évidence qu'en réponse à la fois au mouvement aléatoire et biologique, l'amplitude de P100 diminuait, suggérant des déficits non spécifiques au mouvement biologique. De plus, la N200 occipitotemporal a montré une latéralisation au niveau de l'hémisphère droit moins importante dans le TSA. Une réponse plus tardive, après 400 ms, interprétée comme reflétant des processus « top-down » montrait une amplitude plus faible dans le TSA. Les auteurs ont ainsi soutenu la notion d'effet en cascade,

d'atteinte des étapes de traitement précoces, sur les étapes subséquentes du traitement du mouvement biologique. Enfin, l'étude de Hirai et al. (2014) montre l'absence d'une différence dans la réponse d'une composante cérébrale à environ 350 ms entre le mouvement biologique et le mouvement aléatoire dans le TSA. Les auteurs ont ainsi suggéré une hypersensibilité à l'information locale du mouvement ainsi qu'une perception globale du mouvement biologique diminuée dans le TSA.

1.1.4 Particularités autistiques : une cause sensorielle ?

Certaines particularités sensorielles sont observables dès les premiers stades de développement de l'enfant TSA et semblent avoir un rôle déterminant dans l'apparition progressive des troubles de l'interaction sociale. Cela a notamment été mis en évidence par l'analyse rétrospective de films familiaux de bébés ultérieurement diagnostiqués avec un TSA qui constituent une source riche de recueils d'informations concernant les troubles sensoriels dans le TSA (Iarocci & McDonald, 2006). Sauvage (1988) et Sauvage et al. (1988) ont rapporté plus précisément des comportements sensori-moteurs atypiques chez des nourrissons de 0 à 2 ans qui seront ultérieurement diagnostiqués avec un TSA. Cela s'exprimait par une hypotonie, une hypo-activité motrice (e.g., gesticulation faible, enfant « trop calme »), des manifestations motrices atypiques (e.g., balancements du corps, « jeux de mains ») ainsi qu'une réactivité sensorielle (visuelle, auditive, proprioceptive et vestibulaire) inhabituelle. D'autres études (Adrien et al., 1991, 1993) ont montré, pour des nourrissons âgés de 1 mois à 2 ans, des réactions atypiques aux sons, une activité motrice anormale telle que des stéréotypies et un niveau d'activité pouvant aller d'une extrême passivité à une extrême excitabilité. De semblables troubles sensoriels et moteurs ont été observés chez des nourrissons âgés de 0 à 6 mois ultérieurement diagnostiqués avec un TSA. Les enfants présentaient une posture corporelle anormale, une motricité désorganisée (e.g., manque de coordination), des explorations visuelles inhabituelles, une pauvreté des regards au partenaire de l'interaction ainsi qu'un manque de réactivité à l'interpellation par le prénom. La présence de ces troubles sensorimoteurs précoces seraient impliqués dans le développement de troubles interactifs chez ces mêmes nourrissons (Degenne et al., 2009). Dahlgren & Gillberg (1989) ont trouvé que la sensibilité aux informations auditives pendant l'enfance est un fort discriminatoire des enfants avec et sans TSA. D'autres recherches ont souligné que les premiers signes de dysfonctionnement sensoriel pouvant englober les capacités sensorimotrices inférieures, une recherche visuelle accrue, une attention

dirigée vers les détails et une recherche de sensations, permettraient de prédire le diagnostic de TSA chez de jeunes enfants ainsi que la sévérité de leurs symptômes sociaux (Gliga et al., 2015; Robertson & Baron-Cohen, 2017a; Turner-Brown et al., 2013). Les données de ces études sur le dépistage précoce du TSA mettent en évidence des marqueurs de dysfonctionnements sensori-moteurs, parmi lesquels la recherche tout comme l'évitement de stimulations font partie des signes d'alerte chez les enfants de 18 mois (Haute Autorité de Santé, 2018). Présents dès le plus jeune âge, les désordres sensoriels perdurent tout au long de la vie et engendrent des difficultés quotidiennes chez les individus TSA, comme l'illustrent les témoignages cliniques : « Même aujourd'hui, des bruits soudains comme une voiture qui pétarade me font sursauter et me paniquent. Des bruits forts et aigus comme celui d'une motocyclette sont encore douloureux pour moi » (Grandin, 1995).

En plus de ce pan de littérature, un nombre croissant d'études ont mis en évidence un lien entre les particularités sensorielles dans le TSA et l'intensité, voire l'émergence des autres particularités autistiques. Cela concerne autant le premier axe de diagnostic porté sur les difficultés sociales, que le second axe centré sur les comportements répétitifs et stéréotypés. Plus concrètement, il est communément retrouvé des corrélations entre le profil sensoriel et les capacités sociales chez les sujets TSA. Une sévérité plus importante des symptômes sensoriels étant liée à des difficultés sociales plus prononcées (e.g., Derakhshanrad et al., 2022; Hilton et al., 2007; Kern et al., 2006; Matsushima & Kato, 2013). En outre, Kojovic et al. (2019) ont constaté que plus les enfants TSA présentaient une sévérité élevée des symptômes sensoriels, plus le mode d'exploration visuelle de scènes sociales différait du groupe contrôle. Une des compétences particulièrement importantes dans nos interactions sociales est l'attention conjointe. Celle-ci nous permet d'attirer et de maintenir une attention partagée avec une autre personne vers un objet ou vers autrui et a été décrite plus faible dans le TSA (voir la revue de Stahl et al., 2003). Baranek et al. (2013) ont mis en évidence que le niveau d'hyporéactivité sensorielle prédisait des niveaux inférieurs d'attention conjointe et de langage. Plusieurs auteurs ont d'ailleurs constaté que l'hyporéactivité ainsi que la recherche de sensations prédisaient négativement les performances langagières (Feldman et al., 2020; Lane et al., 2010; Tomchek et al., 2018; Watson et al., 2011). Liss et al. (2006) ont indiqué que l'hyperréactivité prédisait négativement les aptitudes sociales et que l'hyporéactivité ainsi que la recherche de sensations prédisaient négativement l'autonomie dans la vie quotidienne d'enfants TSA.

Les comportements restreints et répétitifs comprennent notamment le battement des mains, le balancement du corps, le fait de ranger les objets dans un certain ordre, d'insister pour placer les objets au même endroit et peuvent être regroupés en 5 sous-catégories (Bodfish et al., 2000) :

- Les comportements répétitifs sensori-moteurs/stéréotypés
- Les comportements ritualisés/insistance sur la similitude
- Les comportements compulsifs
- Les intérêts restreints/circonscrits
- Les comportements d'automutilation

Les enfants TSA présentant des atypies sensorielles seraient plus susceptibles de présenter ces comportements (Baker et al., 2008; Chen et al., 2009; Gabriels et al., 2008) et des anomalies sensorielles sévères ont été associées à un plus grand nombre de comportements répétitifs (Chen et al., 2009). Les travaux de Kojovic et al. (2019), Lane et al. (2010) et Liss et al. (2006) ont démontré une association significative entre des dysfonctionnements sensoriels sévères et la réponse aux items portant sur le comportement adaptatif de la Vineland. Ces items portaient sur des difficultés à se conformer, une mauvaise régulation de l'humeur, le repli sur soi, l'impulsivité, l'agressivité, les comportements d'automutilation, l'hyperactivité, les intérêts restreints et les comportements répétitifs sensori-moteurs. Boyd et al. (2010) ont étudié la façon dont certains comportements restreints et répétitifs (stéréotypie, automutilation, compulsion, rituel et intérêt restreint) sont associés aux dysfonctionnements sensoriels dans le TSA. Finalement, le score d'hyperréactivité sensorielle était associé avec la stéréotypie, l'automutilation, les compulsions et les rituels, le score de recherche de sensations était associé avec la stéréotypie, l'automutilation et les rituels et le score d'hyporéactivité sensorielle était lié aux stéréotypies (voir la revue de Hazen et al., 2014).

L'ensemble de ces recherches met ainsi en évidence l'apparition précoce des symptômes sensoriels, qui précèdent l'apparition des symptômes sociaux et qui pourraient prédire un diagnostic ultérieur de TSA ainsi qu'une association communément retrouvée entre la sévérité des symptômes sensoriels et sociaux. Cela a conduit de récentes études (Robertson & Baron-Cohen, 2017a; Thye et al., 2018) à formuler l'hypothèse selon laquelle les particularités sensorielles pourraient être au cœur de la symptomatologie autistique et contribuer à l'émergence des difficultés sociales et des comportements restreints et répétitifs. Cette hypothèse est notamment soutenue par la notion de pyramide des apprentissages (Williams & Shellenberger, 1996) qui met en évidence que tout apprentissage dépend du développement préalable du fonctionnement sensoriel et moteur. Ainsi, une atteinte précoce des systèmes

sensoriels et moteurs pourrait avoir des conséquences en cascade sur le développement de capacités plus complexes telles que les habiletés socio-communicatives (voir Figure 4). Cela peut également être illustré par des similitudes entre les symptômes du TSA et le comportement d'individus présentant un trouble sensoriel (visuel ou auditif), qui ont été mises en évidence dans la littérature. Les points communs entre les sujets TSA et ceux atteints de troubles visuels (malvoyance ou cécité totale) concernent notamment des difficultés de l'interaction sociale (Preisler, 1991; Urwin, 1983), de théorie de l'esprit (Green et al., 2004; Peterson et al., 2000; Roch-Levecq, 2006), d'expression et de reconnaissance des émotions (Dyck et al., 2004; Minter et al., 1991; Roch-Levecq, 2006), du jeu symbolique et fonctionnel (Bishop et al., 2005; Lewis, 2000) et la présence de maniérismes, rituels et de stéréotypies comportementales (Tröster et al., 1991). Notons qu'en dehors de trouble prononcé du système visuel (malvoyance ou cécité totale), une atteinte partielle peut également impacter le système de l'individu. Khanna et al. (2020) ont étudié la relation entre la sévérité du TSA et la présence de troubles ophtalmologiques. Sur l'ensemble des participants TSA, 39% ont présenté une atteinte de l'acuité visuelle, un quotient verbal plus faible, des difficultés plus prononcées dans les interactions sociales et des troubles comportementaux plus importants. Au niveau auditif, les enfants sourds ou malentendants ont présenté des compétences sociales plus faibles que les enfants contrôles. Par exemple, Hoffman et al. (2015) ont rapporté des habiletés socio-communicatives significativement plus faibles chez des enfants atteints d'une surdité sévère à profonde par rapport aux enfants contrôles. Des résultats similaires ont été retrouvés chez des enfants porteurs d'implant cochléaire pour une malentendance bilatérale (Wiefferink et al., 2012) et unilatérale (Laugen et al., 2017) ainsi que chez des enfants atteints de malentendance sans implant (Meinzen-Derr et al., 2014). En outre, des performances plus faibles dans des tâches de théorie de l'esprit ont été mises en évidence chez des participants sourds (Peterson & Siegal, 1995, 1999). Plusieurs études ont suggéré un lien entre le niveau de réponse à la théorie de l'esprit et l'accès précoce à la langue des signes. Plus concrètement, les enfants sourds de parents sourds ont présenté de meilleures performances relativement aux enfants sourds de parents entendants n'ayant pas acquis la langue des signes (e.g., Courtin, 2000). Néanmoins, ce constat reste discuté car plus récemment Marschark et al. (2019) n'ont pas répliqué ce résultat, ce qui suggère que les réponses des participants sourds aux tests de théorie de l'esprit ne seraient pas uniquement modulées par l'accès à la communication sociale dans la petite enfance.

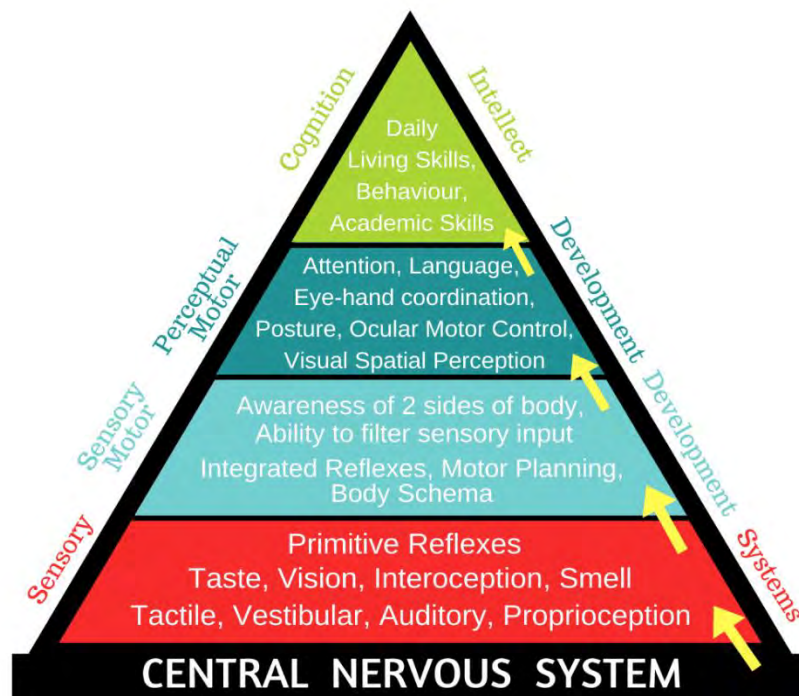


Figure 4. La pyramide des apprentissages. Adaptée de *Williams & Shellenberger (1996)*.

En somme, l'ensemble de cette littérature met en évidence le rôle crucial des processus sensoriels dans l'intensité, voire l'émergence des particularités autistiques. Une question se pose : Quel mécanisme sensoriel dans le TSA est plus particulièrement responsable des effets en cascade sur le développement ? Étant donné qu'aucune étiologie du TSA n'a encore été découverte, le nombre de théories n'a cessé de croître au cours des trente dernières années (voir section 4.1). Néanmoins, une des théories fondées sur une approche unitaire des désordres sensoriels dans le TSA est particulièrement intéressante pour le travail de cette thèse, qui investit des stimuli multisensoriels en mouvement: l'hypothèse du Désordre du Traitement Temporo-Spatial des flux multisensoriels (DTTS, Gepner & Féron, 2009). Les auteurs ont proposé que les individus TSA présenteraient des difficultés à traiter en temps réel les stimuli multisensoriels dynamiques qui constituent notre environnement, à les associer en schémas significatifs et cohérents et à produire des ajustements sensori-moteurs ainsi que des réponses verbales et non verbales adaptées. Cette théorie est notamment issue d'arguments autobiographiques: par exemple, une « [...] intolérance au mouvement des yeux

de l'autre personne » (Grandin, 1995), mais aussi le témoignage de Williams (1992) qui partage: « J'ai toujours aimé le dicton « Arrêtez le monde, je veux descendre ». Le stress d'essayer de rattraper et de suivre le rythme devenait souvent trop important et je me suis retrouvé à essayer de tout ralentir et de prendre du temps pour moi... L'une des façons de donner l'impression que les choses ralentissent était de cligner des yeux ou d'allumer et d'éteindre les lumières très rapidement. Si vous clignez des yeux très rapidement, les gens se comportent comme dans les vieux films image par image, comme l'effet des lumières stroboscopiques ». Au niveau expérimental, nous avons vu dans la partie précédente qu'il est communément observé des difficultés pour les sujets TSA à traiter des informations en mouvement. Selon les auteurs de la théorie DTTS, cela serait sous-tendu au niveau neurophysiologique par un défaut de connectivité et de synchronisation cérébrale. Au sein du TSA, des anomalies de connectivité cérébrale fonctionnelle (voir les revues de Geschwind & Levitt, 2007; Minshew & Williams, 2007; Rippon et al., 2007; Wickelgren, 2005), des différences d'activité au niveau des gammes de fréquence beta et gamma (Brown et al., 2005; Orekhova et al., 2007; Wilson et al., 2007) ainsi que des inconsistances dans les réponses neuronales (Heller Murray et al., 2022; Kovarski et al., 2019; Latinus et al., 2019) ont été retrouvées. Les inconsistances des réponses neuronales marqueraient des défauts de synchronisation des décharges neuronales engendrant des difficultés de *codage temporel* de l'information sensorielle (Gepner, 2006). En conséquence à ces *dyssynchronies et dysconnectivités* cérébrales (Gepner, 2006), la rapidité du mouvement des informations sensorielles ne permettrait pas aux sujets TSA de les traiter convenablement. Les DTTS provoqueraient des troubles du traitement sensoriel à l'origine des principaux symptômes du TSA (voir Figure 5). En ce sens, plusieurs travaux ont mis en évidence une perception nettement améliorée lorsque la vitesse de présentation des stimuli est ralentie. Plus précisément, les sujets TSA s'amélioreraient dans la compréhension du langage lorsque la vitesse de présentation est au moins deux fois moins rapide que la vitesse écologique, que ce soit dans la discrimination de mots phonologiquement proches, que dans la catégorisation phonémique, ainsi que dans la compréhension de consignes d'actions simples et doubles (Lainé et al., 2009 ; Tardif et al., 2002). Les auteurs ont également mis en évidence un bénéfice lorsqu'un tel ralentissement est utilisé dans des tâches de reconnaissance et d'imitation d'expressions faciales (Lainé et al., 2008; Tardif et al., 2007). De nombreuses études ont proposé des atypies d'exploration du visage dans le TSA, qui seraient en partie à l'origine des difficultés sociales telles que la reconnaissance des émotions et la lecture des intentions d'autrui (e.g., Jones & Klin, 2013; Klin et al., 2002; Tanaka & Sung, 2016). En ralentissant la vitesse de présentation, une augmentation de la durée du regard des enfants TSA sur le visage, plus

particulièrement au niveau des lèvres et des yeux a été observée (Tardif et al., 2016). L'ensemble de ces résultats a motivé la création d'un logiciel de ralentissement Logiral™ (Tardif & Gepner, 2012), que les professionnels, les familles ou plus directement les personnes TSA peuvent utiliser pour ajuster la vitesse de présentation de tous types de supports. L'étude longitudinale de Meiss et al. (2015) a montré que la présentation régulière d'informations sociales ralenties avec un tel logiciel améliore l'attention, la réciprocité des échanges et la communication non verbale et diminue les comportements inappropriés (par exemple, agitation motrice, mouvements pulsionnels, stéréotypies, isolement). Plus récemment, une étude comparative a été développée entre un groupe TSA ne bénéficiant pas de présentation de vidéos ralenties et un autre groupe TSA bénéficiant d'un tel visionnage lors de séances d'orthophonie (Gepner et al., 2022). Les résultats ont indiqué d'une part, une augmentation de l'imitation ainsi que du temps de fixation de la bouche et des yeux et d'autre part, une diminution des comportements inappropriés uniquement dans le groupe ayant bénéficié d'un visionnage ralenti.

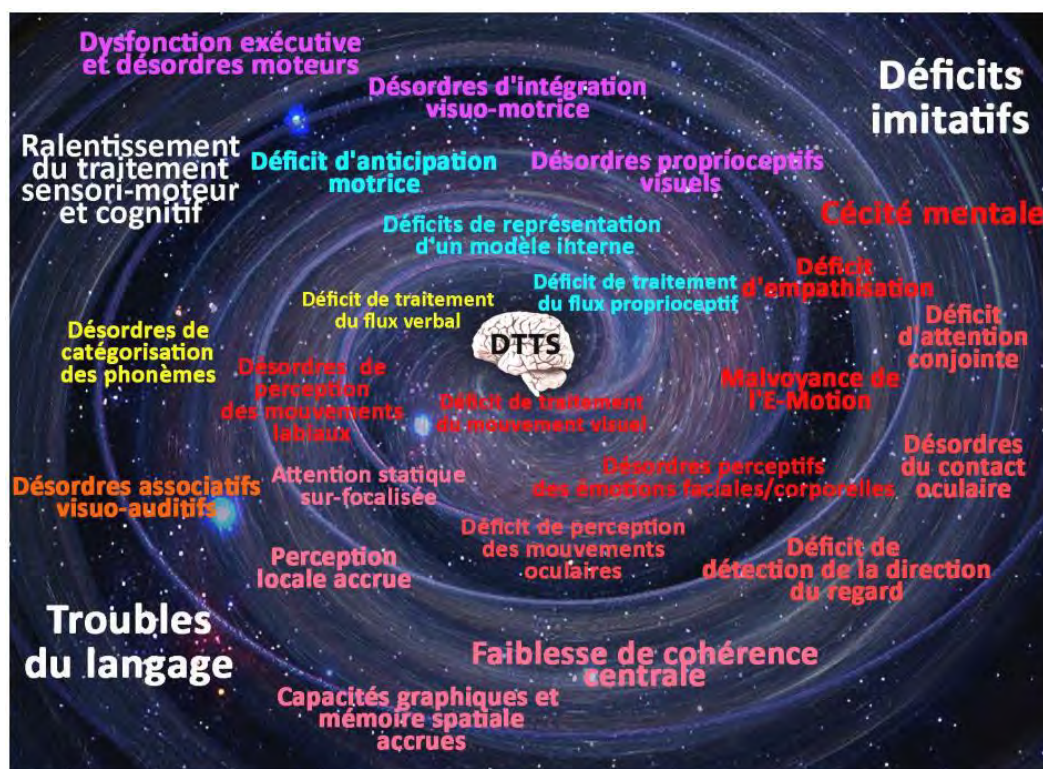


Figure 5. Conséquence en cascade d'un désordre du traitement temporo-spatial des flux multisensoriels. Issue de Gepner, Lainé & Tardif (2010).

1.1.5 Résumé

- ❖ Le Trouble du Spectre de l'Autisme (TSA) est un **trouble du neurodéveloppement** d'apparition **précoce** et dont les **manifestations sont hétérogènes** au niveau intra et interindividuel.
- ❖ Les particularités sociales et sensorielles se retrouvent dans la population générale sous la forme de **traits de personnalité autistique**.
- ❖ Les particularités sensorielles dans le TSA s'observent rapidement après la naissance, **précèdent l'apparition des troubles sociaux** et semblent **contribuer à l'intensité/émergence de ces derniers**. Cet argument est notamment renforcé par l'observation de **comportements autistiques chez des personnes avec un trouble sensoriel**.
- ❖ Le modèle de Gepner & Féron (2009) propose qu'un **désordre du traitement temporel et spatial** des informations sensorielles serait le mécanisme responsable des effets en cascade sur le développement des sujets TSA. **Ralentir la présentation des informations améliorerait la perception** de ces derniers.

1.2 Vers une approche écologique du TSA : La multisensorialité et le mouvement.

L'intégration multisensorielle (IMS) consiste à fusionner les entrées sensorielles provenant de modalités sensorielles multiples afin de construire une représentation interne unifiée et cohérente de notre environnement (Mcgurk & Macdonald, 1976). Bien que les études explorent l'IMS en utilisant communément des informations statiques, que ce soit chez les sujets non-TSA (voir la revue de Stein et al., 2020) ou chez les sujets TSA (voir la revue de Feldman et al., 2018), nous avons choisi d'étudier l'IMS à partir de stimuli en mouvement étant donné que nos activités quotidiennes nous exposent principalement à des informations dynamiques provenant des différents sens. L'information multisensorielle en mouvement représente ainsi une construction plus écologique.

1.2.1 L'intégration multisensorielle (IMS) au niveau comportemental

« A l'instant même où la gorgée mêlée des miettes du gâteau toucha mon palais, je tressaillis, attentif à ce qui se passait d'extraordinaire en moi. [...]. L'odeur et la saveur restent encore longtemps, comme des âmes, à se rappeler, à attendre, à espérer, sur la ruine de tout le reste, à porter sans fléchir, sur leur gouttelette presque impalpable, l'édifice immense du souvenir. [...] Dès que j'eus reconnu le goût du morceau de madeleine trempé dans le tilleul [...] aussitôt la vieille maison grise sur la rue, [...] vint comme un décor de théâtre [...] ; et avec la maison, la ville, [...] les rues où j'allais faire des courses, les chemins qu'on prenait si le temps était beau. [...] Tout cela qui prend forme et solidité, est sorti, ville et jardins, de ma tasse de thé ».

Marcel Proust, p. 140-145, « Du côté de chez Swann » (Proust, 1987).

L'humain possède différents organes sensoriels, au travers desquels il perçoit son environnement (Stein & Meredith, 1993). Chacun d'entre eux permet d'accéder à une représentation distincte de l'environnement, pour laquelle il n'y a parfois aucun équivalent dans une autre modalité (Harris et al., 1980; Morrell, 1972; Spence & Driver, 2004). Dans ce contexte, une question cruciale a suscité l'intérêt dans le milieu philosophique et scientifique depuis plusieurs décennies : Comment arrive-t-on à une représentation cohérente du monde qui nous entoure ? L'intégration multisensorielle des informations obtenues à partir des différents systèmes sensoriels serait ce qui permet d'accéder à cette perception unifiée de l'environnement (voir la revue de Stein & Stanford, 2008).

Les effets de l'intégration multisensorielle sont multiples et peuvent autant amener à des altérations qu'à des facilitations perceptuelles. Nous allons détailler ces phénomènes dans les paragraphes suivants en mentionnant brièvement les illusions perceptives et en développant les bénéfices comportementaux que peut induire l'IMS ainsi que la quantification de ces derniers.

Concernant les illusions multisensorielles, les plus connues concernent la modalité visuelle et la modalité auditive, l'une influençant l'expérience sensorielle de l'autre, telle que la ventriloquie (cette illusion peut être testée sur le site: <https://www.youtube.com/watch?v=0zHRGUNF0pI>). Le ventriloque minimise le mouvement de ses lèvres afin que le public associe l'information auditive (la parole) à la marionnette que le ventriloque agite en cohérence avec la parole. Cette illusion est générée par la cohérence temporelle et spatiale de l'information auditive (la parole) et visuelle (le mouvement de la marionnette), qui sont en conséquence fusionnées en un percept unifié (Bertelson & Radeau, 1981; Slutsky & Recanzone, 2001). En outre, elle proviendrait également de l'effet de dominance visuelle dans la localisation spatiale de stimuli auditifs (Kitagawa & Ichihara, 2002). Cet effet de ventriloquie a également été reproduit pour des stimuli simples tels que des bips, des flashes et des LED (Slutsky & Recanzone, 2001; Stekelenburg & Vroomen, 2005; Vroomen et al., 2004). Une autre illusion perceptuelle que nous pouvons mentionner est l'effet McGurk (McGurk & Macdonald, 1976). Cette illusion se produit lorsque des syllabes auditives (par exemple, / ba /) et visuelles (par exemple, / ga /) non concordantes sont présentées (cette illusion peut être testée sur le site: <http://www.youtube.com/watch?v=G-IN8vWm3m0>). Dans cet exemple, les sujets perçoivent un percept erroné (/ da /), c'est-à-dire une syllabe qui n'est ni vue ni entendue. Ce percept illusoire peut s'expliquer par le fait que les informations auditives et visuelles de la parole, dans les conditions habituelles, sont complémentaires et concordantes. Ainsi, les informations auditives et visuelles incongruentes vont entrer en conflit et engendrer une illusion. Les illusions mentionnées ci-dessus (ventriloquie et effet McGurk) montrent que la vision peut altérer la perception auditive. Réciproquement, certaines illusions nous montrent que l'audition peut altérer la perception visuelle. C'est le cas de l'illusion flash-beep (Shams et al., 2002) dans laquelle plusieurs flashes sont perçus lorsque la présentation d'un seul flash est associée à plusieurs tonalités auditives (cette illusion peut être testée sur le site: <https://www.youtube.com/watch?v=D3Z1cxA2Tp0>).

L'intégration multisensorielle engendre également des améliorations perceptives. Cela est particulièrement le cas dans notre perception du langage. Nous en avons fait l'expérience lors de la pandémie du Covid-19 pendant laquelle des masques couvraient la partie basse de nos visages. N'ayant plus accès aux indices visuels du langage (le mouvement labial), celui-ci était en conséquence unisensoriel (auditif), ce qui nous a fait rencontrer des difficultés à comprendre autrui. Par exemple, l'étude de Aguilon-Hernandez et al. (2022) a effectivement mis en évidence des difficultés de discrimination des émotions liées au port du masque.

Le paradigme de la parole dans le bruit ou *speech in noise paradigm* (Sumbly & Pollack, 1954) a été largement étudié dans le cadre de l'IMS. En effet, l'intégration des signaux auditifs et visuels de la parole contribue à la compréhension de l'information linguistique lorsque le signal auditif est dégradé. Plus concrètement, la vision du mouvement des lèvres facilite la reconnaissance de la parole en milieu bruyé. Dans une telle tâche expérimentale, la vision du mouvement des lèvres permet une amélioration de la compréhension de la parole dans le bruit, à un niveau équivalent à un rapport signal sur bruit supérieur de 10 à 20dB. Les améliorations perceptives ont également été largement mises en évidence dans des tâches impliquant des stimulations simples. Stein & Meredith (1993) ont été les premiers à démontrer une facilitation comportementale liée à l'IMS dans une tâche de localisation de sources auditives, visuelles ou audiovisuelles, dans laquelle les performances étaient améliorées en condition audiovisuelle. Cette facilitation multisensorielle se manifestait par des taux de réponses correctes plus élevés et des temps de réaction plus courts. Depuis lors, de nombreux paradigmes expérimentaux ont été développés (voir Figure 6) pour tester les effets comportementaux de l'IMS et il a été démontré que celle-ci améliore un large éventail de comportements, y compris la simple détection (Forster et al., 2002; Giray & Ulrich, 1993; Hershenson, 1962; Laurienti et al., 2004; Lovelace et al., 2003; Miller, 1982; Molholm et al., 2002), la localisation (Hughes et al., 1994; Miller, 1991; Schröger & Widmann, 1998; Stein et al., 1989) ou l'identification (Giard & Peronnet, 1999; Miller, 1982, 1991; Reisberg et al., 1987; Summerfield, 1987).

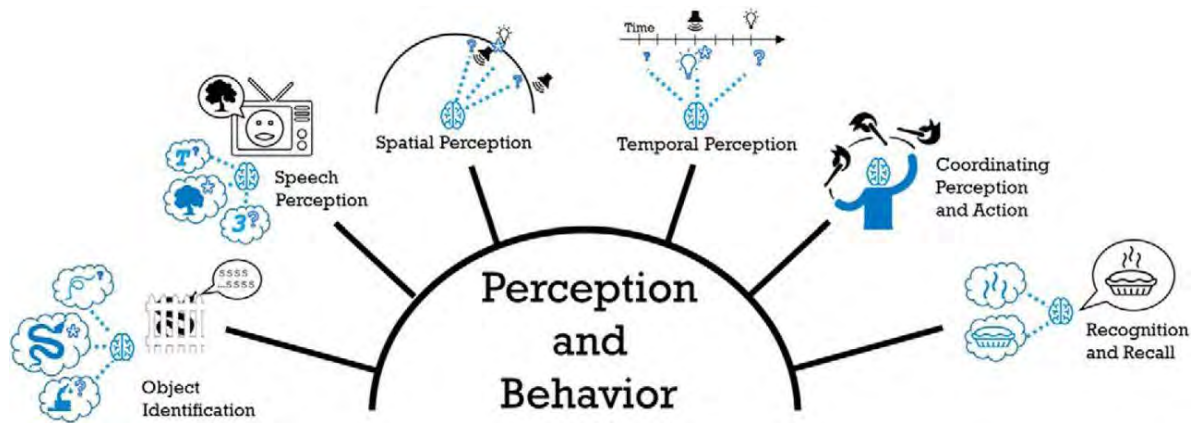


Figure 6. L'intégration multisensorielle améliore les performances dans un certain nombre de domaines perceptifs et comportementaux. Issue de *Stein et al., 2020*

Un des avantages du paradigme expérimental de détection, tel qu'appliqué dans les travaux de cette thèse, est qu'il permet de quantifier la facilitation multisensorielle. Plus précisément, le modèle de la course (Raab, 1962), suggère qu'en condition multisensorielle (e.g., audiovisuelle), chaque entrée sensorielle est traitée indépendamment dans son propre canal sensoriel. Une facilitation comportementale peut être alors générée par une course entre l'information visuelle et auditive composant le stimulus multisensoriel, le signal le plus rapidement traité gagne la course et engendre la réponse comportementale. Quelques années plus tard, Miller (1982) développe le modèle de coactivation, qui prédit que l'interaction entre les canaux unisensoriels se produit avant l'initiation de la réponse comportementale. Un tel phénomène interactif est testé avec l'inégalité de Miller qui prédit que la distribution cumulative des temps de réaction pour les stimuli multisensoriels n'excède jamais la distribution additionnée des stimuli unisensoriels. Pour toute latence t , le modèle est valable lorsque la valeur de probabilité cumulée (PC) des essais multisensoriels (TRAV) est inférieure ou égale à la somme des probabilités cumulées de chacun des stimuli unisensoriels (TRA ; TRV) moins l'expression de leur probabilité conjointe (voir Figure 7) :

$$PC \text{ prédit } (TRAV \leq t) = PC (TRA \leq t) + PC (TRV \leq t) - PC (TRA \leq t) * PC (TRV \leq t).$$

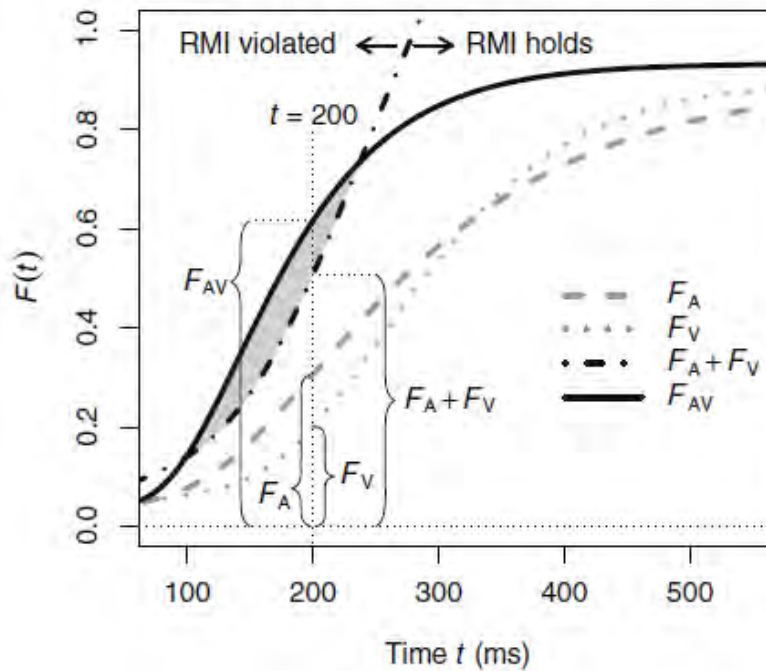


Figure 7. Modèle de la course (Miller, 1982). Les fonctions de distribution cumulatives $F(t)$ des temps de réaction pour les stimuli auditifs, visuels et audiovisuels, ainsi que la somme des distributions pour les temps de réaction auditifs et visuels ($F_A + F_V$) sont représentées. Issue de *Gondan & Minakata, 2016*.

Dans la Figure 7, la distribution cumulative des temps de réaction en condition audiovisuelle (F_{AV}) devrait toujours être inférieure/à droite de $F_A + F_V$. Dans cet exemple, le modèle est notamment violé à $t = 200$ ms, car $F_{AV}(200)$ est inférieur à $F_A(200) + F_V(200)$. La violation se produit dans la plage illustrée par la zone grisée.

Des valeurs d'inégalités de Miller sont calculées en soustrayant les fonctions de distribution cumulatives pour les stimuli audiovisuels à la distribution des temps de réaction auditifs + visuels, c'est-à-dire : $F(AV) - (F_A + F_V)$ (voir Figure 8).

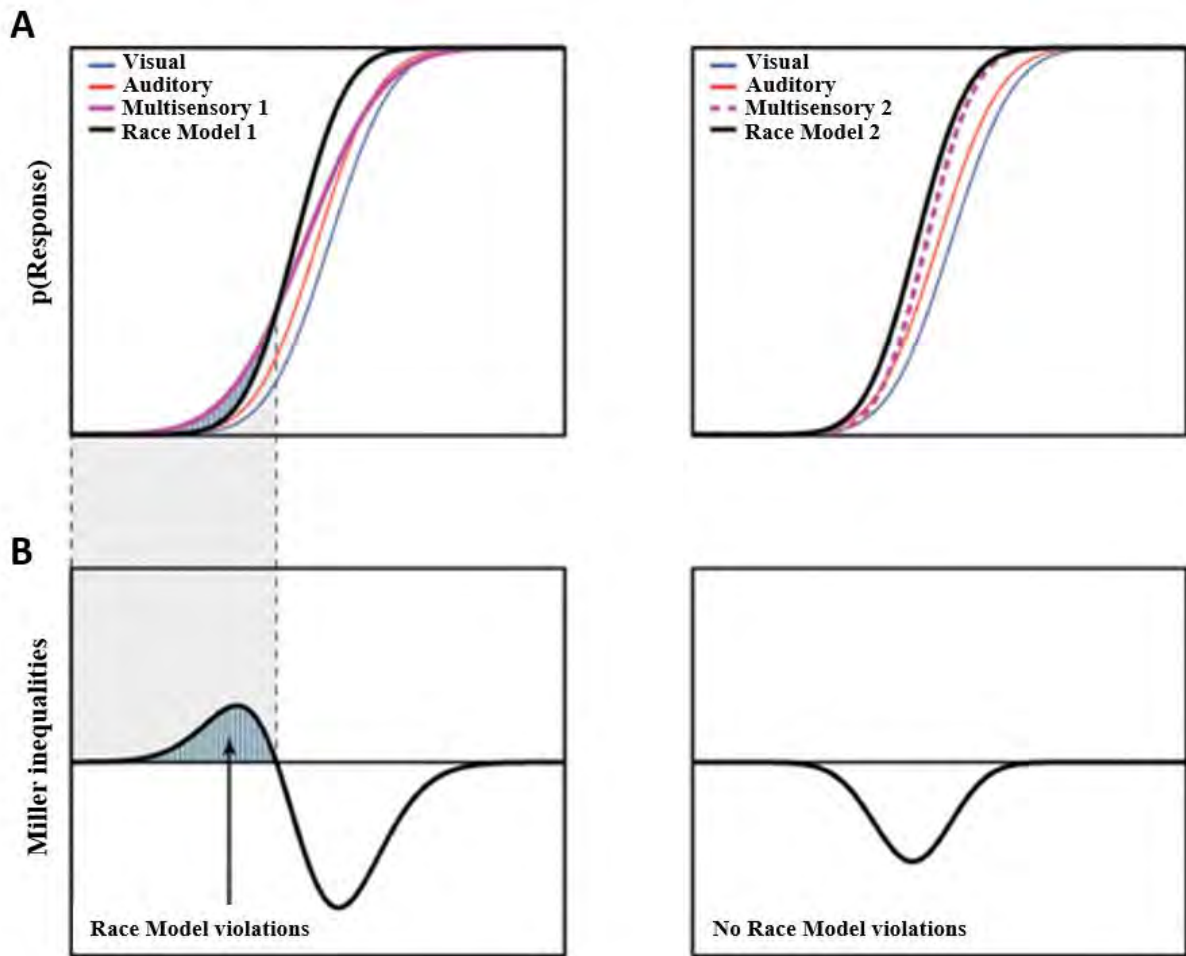


Figure 8. Calcul de l'inégalité de Miller. A partir des fonctions de distribution cumulatives (A), les inégalités de Miller sont calculées en soustrayant la distribution des temps de réaction pour la condition audiovisuelle à celle prédite par le Race Model (B). Adaptée de *Stevenson et al., 2014*.

En outre, les caractéristiques temporelles de l'IMS ont été particulièrement étudiées à partir de la fenêtre temporelle d'IMS ou plus exactement *temporal binding window* (Meredith et al., 1987; Spence & Squire, 2003). Celle-ci correspond à la plage temporelle dans laquelle des stimuli provenant de différentes modalités sensorielles sont perçus comme simultanés. La construction d'une telle fenêtre est hautement adaptative, dans la mesure où elle permet de lier des informations sensorielles provenant de différents sens même si ces informations ne sont pas tout à fait simultanées. Cette asynchronie pouvant être induite aussi bien par des processus internes: le système auditif présente un temps de traitement de l'information plus rapide que le système visuel (Shelton & Kumar, 2010), qu'externes. Pour ce dernier, prenons l'exemple d'un événement audiovisuel qui se produit à un mètre de nous ou à 34 mètres. Dans le premier cas, l'arrivée des informations visuelle et auditive à l'œil et à l'oreille est presque simultanée, alors que dans le second cas, l'information auditive arrive à l'oreille environ 100 ms après l'arrivée de l'information visuelle à l'œil (le son voyage à environ 340 m/s vs. 299 792 458 m/s pour la lumière). Cette fenêtre d'IMS est étudiée en présentant aux sujets une paire de stimuli visuels et auditifs avec des valeurs d'asynchronie variables dont ils doivent juger la simultanéité (voir la revue de Wallace & Stevenson, 2014).

1.2.2 L'IMS et le mouvement : des interactions spécifiques ?

Pour commencer, l'intégration multisensorielle a été particulièrement investiguée dans la perception du mouvement provenant de soi. Dans ce cadre, l'intégration multisensorielle visuo-vestibulaire a fait l'objet de nombreuses études. En effet, pour naviguer efficacement dans un environnement tridimensionnel complexe, nous devons estimer avec précision notre propre mouvement par rapport aux objets qui nous entourent. La perception d'un tel mouvement a un niveau élevé d'exigence d'intégration sensorielle puisqu'elle nécessite principalement la combinaison neuronale de signaux visuels (par exemple, le flux optique) et de signaux vestibulaires concernant le mouvement de la tête (Dichgans et al., 1974; Hlavacka et al., 1996; Hlavačka et al., 1992). Prenons l'exemple d'un joueur de football qui court pour intercepter une passe et diriger le ballon vers le but. Ce joueur doit être capable d'évaluer avec précision la trajectoire du ballon par rapport à la trajectoire de son propre mouvement, afin de synchroniser précisément son mouvement de tête pour taper le ballon (voir la revue de Angelaki et al., 2011). En ce sens, les résultats issus d'études comportementales, neurophysiologiques et computationnelles ont mis en évidence le rôle essentiel du système vestibulaire dans différents aspects de la perception du mouvement provenant de soi tels que l'orientation de la tête, la trajectoire du mouvement, la distance et le temps parcouru (voir la revue de Cheng & Gu, 2018).

En outre, la majorité de nos mouvements sont principalement soutenus par l'utilisation simultanée d'informations visuelles, haptiques-proprioceptives et tactiles (Camponogara & Volcic, 2019, 2021). La réalisation optimale d'un mouvement est obtenue par la présentation simultanée des informations visuelles et haptiques à la fois pendant la phase de planification de l'action (c'est-à-dire avant le début du mouvement) et pendant l'exécution du mouvement. Des études sur l'intégration visuomotrice ont montré que l'accès à l'information visuelle pendant l'exécution du mouvement est une condition essentielle pour effectuer un mouvement efficace. Plus précisément, les mouvements de saisie d'objets sont nettement améliorés lorsque l'information visuelle est disponible à la fois pendant la planification et l'exécution du mouvement (Blouin et al., 1993; Elliott & Madalena, 1987; Keele & Posner, 1968; Kennedy et al., 2015, 2015; Khan et al., 2002, 2006; Rossetti et al., 1994; Westwood et al., 2001).

En ce qui concerne les interactions audiovisuelles dans la perception du mouvement, la littérature nous enseigne que la présentation d'un stimulus statique dans une modalité affecte divers aspects du traitement du mouvement dans une autre modalité, comme sa trajectoire (e.g., Hall et al., 1952; Hall & Earle, 1954; Lakatos, 1995; Spelke et al., 1983; Watanabe & Shimojo, 2001), sa vitesse (e.g., Manabe & Riquimaroux, 2000), ou le seuil de perception du mouvement apparent (e.g., Allen & Kolers, 1981; Gilbert, 1939; Ohmura, 1987; Staal & Donderi, 1983; Maass, 1938; Zietz & Werner, 1927). D'autres études ont montré que la présentation d'un stimulus en mouvement dans une modalité engendre la perception d'un stimulus en mouvement dans une autre modalité, qui était initialement présenté de façon statique (e.g., Ehrenstein & Reinhardt-Rutland, 1996; Mateeff et al., 1985; Thurlow & Kerr, 1970; voir la revue de Soto-Faraco et al., 2003). En ce qui concerne plus spécifiquement le mouvement biologique, plusieurs effets d'interaction audiovisuelle (c'est-à-dire entre l'information visuelle du mouvement biologique couplée à des bruits de pas) ont déjà été constatés, tels qu'un bénéfice de la condition audiovisuelle pour détecter le mouvement (Arrighi et al., 2009; Brooks et al., 2007) et un effet de dés-ambiguïté du mouvement biologique visuel par l'ajout de l'information auditive (van der Zwan et al., 2009). En outre, la perception d'asynchronies entre l'information visuelle et auditive du mouvement biologique est améliorée lorsque des marcheurs en position debout sont présentés, en comparaison à des marcheurs inversés ou présentés avec du bruit (Saygin et al., 2008).

Le mouvement en profondeur (en approche et en éloignement) constitue un signal crucial de poursuite d'une cible ou d'évitement d'une menace. En effet, les indices de profondeur transmettent des signaux essentiels comme le rapprochement et l'éloignement qui sont couramment impliqués dans nos interactions sociales lors desquelles une personne s'approche d'une autre pour interagir ou évite le contact social en s'éloignant d'autrui. En outre, un tel mouvement avertit l'organisme de potentiels dangers, tel que l'approche d'un prédateur dans la vie sauvage ou l'approche d'un objet.

Dans le domaine de la vision, la perception du mouvement en profondeur a été largement étudiée. En comparant expérimentalement des informations en approche et en éloignement, les informations visuelles en approche provoquent un comportement défensif stéréotypé à la fois chez les primates non-humains (Schiff et al., 1962) et chez les nourrissons humains (Ball & Tronick, 1971) qui se manifeste par un regard préférentiel à de tels signaux. Le mouvement en profondeur a également été étudié dans le domaine auditif. Une source sonore en approche se caractérise par une augmentation dynamique de l'intensité. Ce modèle d'augmentation de

l'intensité sonore pour illustrer le mouvement en approche semble pertinent puisqu'il renseigne l'instant où la source sonore et l'auditeur vont se rencontrer (Shaw et al., 1991) et induit une augmentation de la conductance cutanée (i.e., une réponse émotionnelle plus importante pour de tels stimuli ; Bach et al., 2009) en comparaison aux signaux en éloignement (diminution de l'intensité).

Qu'advient-il lorsque nous combinons les deux informations sensorielles, auditives et visuelles, transmettant un mouvement en approche ? Bien que des effets interactifs aient été mis en évidence entre l'intégration multisensorielle et le mouvement, tel qu'évoqué précédemment, il semble qu'il existe des effets interactifs spécifiques avec le mouvement en profondeur. En effet, dans le cas d'une rivalité binoculaire¹, le temps de dominance du percept du mouvement en approche a dépassé celui du percept du mouvement en éloignement, ce qui renforce la notion selon laquelle les signaux en approche sont traités de manière préférentielle et prioritaire pour accéder à la conscience humaine (Parker & Alais, 2007). De plus, la présentation simultanée de sons en approche et d'informations visuelles a amplifié ce biais en prolongeant les temps de dominance du percept visuel pour le mouvement en approche. A l'inverse, les sons en éloignement n'ont pas été en mesure de convertir le biais pour le mouvement en approche en un biais pour le mouvement en éloignement. Cette constatation pourrait constituer une première preuve que les interactions multisensorielles sont plus importantes pour le rapprochement que pour l'éloignement (Parker & Alais, 2010). En outre, Kitagawa & Ichihara (2002) ont mis en évidence que la présentation d'un mouvement en approche dans la modalité visuelle engendre la perception d'un mouvement dans la modalité auditive, lorsqu'un stimulus auditif statique est initialement présenté, ce qui suggère que le système auditif module ses réponses selon le mouvement visuel en profondeur. Enfin, Romei et al. (2009) ont testé l'influence des sons en approche sur l'excitabilité du cortex visuel. Pour cela, ils ont utilisé des stimulations magnétiques transcrâniennes au niveau occipital et ont évalué la perception subjective de phosphènes. Leurs résultats ont montré que la présentation de sons en approche amplifiait considérablement l'excitabilité du cortex visuel en augmentant la quantité de phosphènes perçus. En outre, une telle modulation de l'excitabilité du cortex visuel s'est manifestée lors de l'utilisation de sons en approche de très courte durée (80 ms) qui étaient significativement inférieures (de 35 ms) au seuil de discrimination perceptive. Les perceptions visuelles ont donc été rapidement et efficacement renforcées par les sons en approche grâce à une influence

¹ La rivalité binoculaire désigne un phénomène perceptif généré par la présentation d'images différentes à l'œil gauche et à l'œil droit, entraînant l'alternance perceptive des deux stimuli (image de l'œil droit puis image de l'œil gauche) au lieu de leur fusion perceptive.

précoce, pré-perceptive et sélective de l'excitabilité neuronale au sein du cortex visuel. Enfin, des études ont mis en évidence une préférence attentionnelle (temps de fixation >50%) pour les signaux audiovisuels en approche, ce qui n'était pas le cas pour du mouvement en éloignement (Maier et al., 2004). Ces résultats, retrouvés chez des nouveau-nés humains âgés de 9 à 90 heures (voir section 1.2.3; Orioli et al., 2018), suggèrent une intégration spécifique et préférentielle des stimuli multisensoriels en approche.

La facilitation multisensorielle a également été étudiée dans le cadre de l'intégration multisensorielle du mouvement en profondeur. Cappe et al. (2009) ont développé un paradigme de détection de cibles auditives, visuelles et audiovisuelles s'approchant, s'éloignant ou statiques dont une partie a été reprise dans le travail de cette thèse. Les combinaisons des stimuli multisensoriels dans l'étude de Cappe et collaborateurs étaient plus nombreuses et pouvaient être congruentes : Auditif + Visuel en approche, Auditif + Visuel en éloignement, Auditif + Visuel statique, mais également incongruentes : Auditif en approche + Visuel en éloignement, Auditif en éloignement + Visuel en approche, Auditif en approche + Visuel statique, Auditif en éloignement + Visuel statique, Visuel en approche + Auditif statique, Visuel en éloignement + Auditif statique. Pour chaque condition multisensorielle, congruente ou incongruente, les auteurs ont rapporté un effet facilitateur sur les temps de réaction (voir Figure 9A). De plus, dans chaque condition multisensorielle, les bénéfices comportementaux avaient dépassé les prévisions du modèle de la course, suggérant que de tels bénéfices étaient engendrés par des interactions intégratives. D'autre part, les auteurs ont mis en évidence une sensation subjective de la force du mouvement plus importante pour des stimuli multisensoriels en approche ainsi que des temps de réaction nettement plus courts dans une telle condition (voir Figure 9B). Cet avantage comportemental soutiendrait la notion d'une intégration sélective et spécifique des stimuli multisensoriels en approche dont les corrélats neuronaux ont été définis quelques années plus tard (voir section 1.3.2; Cappe et al., 2012).

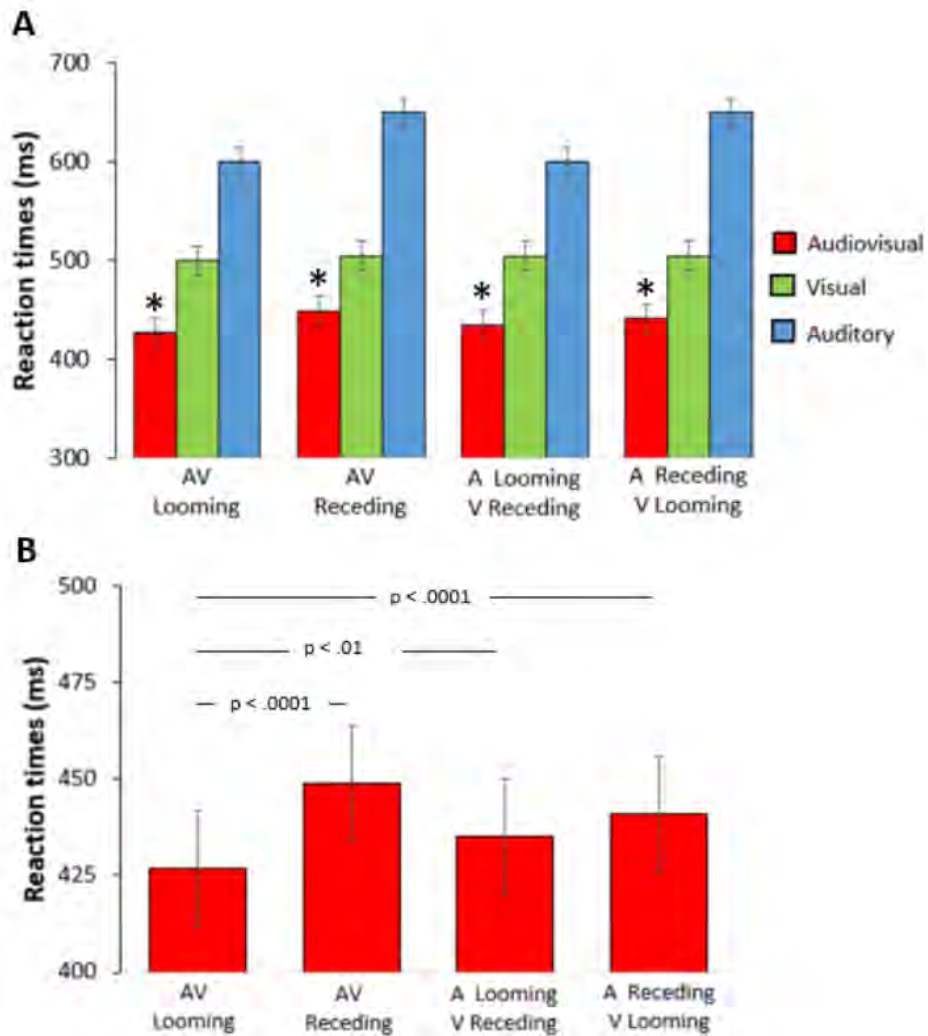


Figure 9. Amélioration comportementale en condition de mouvement multisensoriel en approche. (A) Temps de réaction (ms) selon les conditions sensorielles en mouvement. Les temps de réaction étaient plus courts dans les conditions multisensorielles. (B) La comparaison directe des temps de réaction dans les conditions multisensorielles a révélé des temps de réaction plus courts en condition multisensorielle en approche. Adaptée de *Cappe et al. (2009)*.

1.2.3 Développement de l'IMS

Les individus présentant des déficits sensoriels spécifiques, tels que la surdité congénitale ou la cécité restaurées par des techniques chirurgicales et/ou d'appareillages, constituent des modèles idéaux pour étudier les effets de l'expérience sensorielle sur l'intégration multisensorielle chez l'homme. Par exemple, Putzar et al. (2007) ont mis en évidence des indices d'IMS plus faibles chez des sujets adultes nés avec une cataracte binoculaire congénitale (opérés à environ 8 mois) sur une tâche audiovisuelle non verbale ainsi que sur la perception audiovisuelle de la parole. Des résultats similaires ont été retrouvés chez des individus sourds ayant reçu un implant cochléaire (voir la revue de Stevenson et al., 2017). Ces résultats soulignent l'importance d'un apport sensoriel adéquat pendant la petite enfance pour le développement des interactions multisensorielles (Gori et al., 2010; Hötting & Röder, 2009; Röder et al., 2004, 2007). L'exposition au monde extérieur, dans lequel l'individu est confronté à de multiples informations sensorielles, lui permettrait d'apprendre que certaines propriétés des stimuli tendent à co-varier ensemble et contribuerait au développement de sa capacité à déterminer s'ils appartiennent ou non au même événement (Stein & Rowland, 2011).

Le développement de l'intégration multisensorielle chez les nourrissons a été largement étudié à partir de l'orientation et du temps de regard. De nombreuses études ont suggéré que certains processus multisensoriels sont présents dès le plus jeune âge. Les jeunes enfants pourraient faire correspondre des signaux entre différentes modalités sensorielles (Dodd, 1979; Lewkowicz & Turkewitz, 1981) et détecter l'équivalence des propriétés amodales des objets entre les différents sens (e.g., Patterson & Werker, 2002; Rose, 1981). Par exemple, à l'aide d'un paradigme de regard préférentiel, ils réussissent à associer des visages à des voix (Bahrick, 2001). Patterson & Werker (2003) ont montré que les nourrissons de 2 mois sont capables de faire correspondre les informations relatives aux voyelles au niveau des visages et des voix. De même, Pons et al. (2009) ont démontré que les nourrissons de 6 mois peuvent faire correspondre des phonèmes visibles et audibles, que ces phonèmes soient issus de leur propre langue ou dans d'autres langues. Lewkowicz (1992) a constaté une sensibilité aux relations temporelles entre l'information visuelle et auditive d'un stimulus audiovisuel (un objet rebondissant) chez des nourrissons de tous les groupes d'âge testés (4, 6, 8 et 10 mois). À l'âge de 3 à 5 mois, ils distinguent les changements audiovisuels de tempo et de rythme (Bahrick et al., 2002; Bahrick & Lickliter, 2000), à partir de 4 mois, peuvent faire correspondre des propriétés de formes visuelles et tactiles (Rose & Ruff, 1987) et à environ 6 mois, font des correspondances basées sur la durée de présentation (Lewkowicz, 1986). Il est à noter que les études comportementales

sur le traitement multisensoriel des nourrissons ne sont pas en mesure de tester la présence de phénomènes intégratifs. Les études menées plus tard dans l'enfance (généralement avec des enfants de 6 ans et plus) à partir de paradigme de détection démontrent la présence de facilitation multisensorielle au niveau des temps de réaction dès 8 ans mais des violations du modèle de la course plus tardives, dès 13 ans (Ainsworth et al., 2021; Barutçu et al., 2009; Brandwein et al., 2011) qui seraient similaires à celles des adultes (voir Figure 10). L'ensemble de ces résultats montre que le développement de l'intégration multisensorielle se poursuit tout au long de l'enfance et probablement même à l'adolescence (voir les revues de Burr & Gori, 2012; Dionne-Dostie et al., 2015; Lewkowicz, 2012).

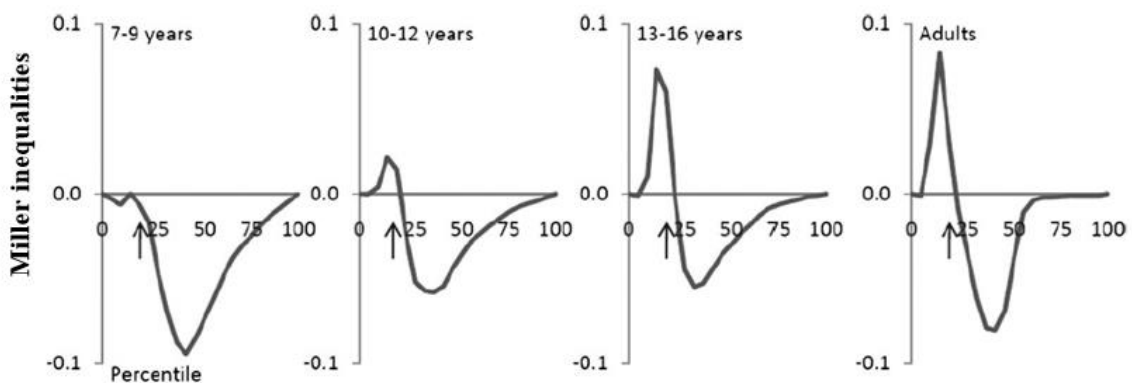


Figure 10. Violation du modèle de la course selon différents groupes d'âge. Les sujets adolescents (entre 13 et 16 ans) ont montré des valeurs de violations similaires aux sujets adultes, ce qui a suggéré des processus intégratifs semblables entre ces deux groupes. Issue de *Brandwein et al. (2011)*.

Le développement de la perception du mouvement en profondeur a été largement investigué dans la modalité visuelle. Les recherches pionnières de ce domaine ont démontré que les primates humains et non-humains réagiraient à des informations en mouvement d'approche dès le plus jeune âge (Schiff, 1965; Schiff et al., 1962). Par exemple, les nourrissons humains âgés de quelques semaines ont réagi par des comportements défensifs qui se manifestaient par des mouvements de tête vers l'arrière, des clignements des yeux et des levées de bras face à un tel mouvement (Ball & Tronick, 1971; Bower et al., 1971; Peiper, 1963). Puisque les indices de profondeur transmettent des signaux essentiels qui informent l'organisme de potentiels dangers, une attention particulière a été portée à l'intégration multisensorielle du mouvement en profondeur. Etant donné le coût potentiellement dangereux d'une mauvaise interprétation des signaux en approche, une intégration préférentielle du mouvement en approche audiovisuel était attendue. En utilisant des paradigmes de préférence visuelle (i.e., temps de fixation), les résultats d'études portées chez des nourrissons vont dans le sens de cette hypothèse. Plus précisément, Walker-Andrews & Lennon (1985) ont présenté à des enfants de 5 mois deux films côte à côte, l'un montrant une voiture s'approchant et l'autre la même voiture s'éloignant, accompagnés d'une seule bande sonore correspondant à l'un des deux (i.e., un son augmentant ou diminuant en intensité). Les résultats ont mis en évidence une préférence visuelle pour le film qui correspondait à la bande sonore de la voiture qui s'approchait. Pickens (1990) a répliqué ces résultats mais en utilisant un petit train comme stimulus visuel. Il a constaté que les enfants de 5 mois coordonnaient les informations de profondeur auditives et visuelles pour les conditions d'approche et d'éloignement et ce, non seulement lorsque le train se déplaçait dans un paysage naturel, mais aussi lorsque le train apparaissait sur un fond noir non texturé et que l'expansion et la contraction optiques étaient les seuls indices visuels de profondeur. En utilisant un design expérimental similaire, Morrongiello & Fenwick (1991) ont plus généralement étudié la sensibilité à la congruence audiovisuelle du mouvement en profondeur chez des nourrissons. A partir d'un jouet battant du tambour comme stimulus, les auteurs ont retrouvé une préférence visuelle pour la congruence audiovisuelle chez les nourrissons de 9 mois. En outre, en utilisant des stimuli simples informatisés, Lewkowicz (2008) a étudié les capacités de perception et de discrimination de séquences audiovisuelles dynamiques à trois éléments. Les nourrissons de 3 mois avaient été habitués à une présentation successive de 3 stimuli audiovisuels en approche et orientaient moins leurs regards vers ces stimuli pour privilégier l'exploration de nouvelles séquences multisensoriels, suggérant des capacités de détection d'informations multisensorielles.

Plus récemment, en reprenant les paradigmes expérimentaux de Walker-Andrews & Lennon (1985) et de Pickens (1990) mais en employant des stimuli simples tels que ceux utilisés dans cette thèse, Orioli et al. (2018) ont mis en évidence une préférence visuelle pour les stimuli congruents en mouvement d'approche audiovisuels chez des nouveau-nés âgés de 19 à 90 heures. Puisqu'une telle préférence avait été également retrouvée chez des primates non-humains en utilisant la même tâche expérimentale (Maier et al., 2004), la part de l'innée dans l'intégration multisensorielle du mouvement en approche a été questionnée comme processus évolutif et adaptatif.

En somme, bien que les capacités d'intégration multisensorielle apparaissent généralement très tôt chez l'individu, l'expérience sensorielle semble néanmoins demeurer une condition sine qua non à son développement, qui semble se poursuivre au moins jusqu'à l'adolescence. Comme nous l'avons vu, le mouvement en profondeur a été appliqué dans ce champ de recherche exclusivement à partir de mesures de préférences visuelles. Contrairement aux paradigmes expérimentaux de détection chez les adultes qui nécessitent une réponse motrice intentionnelle, les mesures de ces dernières études sont limitées aux mouvements de la tête ou des yeux réagissant au stimulus et s'exprimaient en secondes plutôt qu'en millisecondes. Par conséquent, ces derniers résultats doivent être interprétés avec prudence.

1.2.4 Le TSA et l'intégration multisensorielle

Plusieurs études se sont intéressées à l'IMS chez les individus TSA au cours des dernières années mais jusqu'à présent le portrait demeure complexe et confus (voir les revues de Feldman et al., 2018; Wallace & Stevenson, 2014b). Étant donné les difficultés socio-communicatives prédominantes dans le TSA, la plupart des recherches ont exploré l'intégration multisensorielle de deux compétences sociales : l'intégration audiovisuelle des émotions et celle du langage verbal.

Il a été régulièrement rapporté qu'une présentation simultanée d'expressions faciales émotionnelles congruentes (visuelles et auditives) facilite la reconnaissance des émotions (Campanella & Belin, 2007), ce phénomène se retrouvant même chez des nourrissons de 5 à 7 mois (Walker-Andrews & Grolnick, 1983; voir la revue de Klasen et al., 2012). Dans le TSA, des études ont mis en évidence des difficultés à faire correspondre l'information visuelle d'un visage à l'information auditive d'une voix caractérisant une même émotion (Hobson, 1986; Hobson et al., 1988; Loveland et al., 1995; O'Connor, 2007a). Xavier et al. (2015) ont également démontré un bénéfice réduit chez les sujets TSA lors de l'ajout d'une information auditive dans une tâche de discrimination émotionnelle à partir d'expressions faciales. Concernant les données en neuro-imagerie, une étude en TEP a montré une activation diminuée du gyrus fusiforme droit et du cortex frontal inférieur lors de la présentation simultanée d'une voix et d'une expression faciale exprimant la même émotion dans le TSA en comparaison à un groupe contrôle (Hall et al., 2003). Enfin, les résultats d'études en IRMf ont suggéré une diminution de l'activation des régions frontales médiales et orbitofrontales lors d'une tâche de congruence émotionnelle (Loveland et al., 2008) ainsi qu'au niveau des aires associatives frontales et temporales lors d'une tâche d'identification d'émotions présentées par des stimuli audiovisuels (de Boer-Schellekens et al., 2013). Néanmoins, il semble important de préciser que ces études se composent d'informations visuelles statiques, bien qu'il ait été proposé que de telles informations soient constituées d'une faible validité écologique. Les informations dynamiques du visage contribuent à l'identification des émotions et joue un rôle important dans la perception de leur intensité (Ambadar et al., 2005; Biele & Grabowska, 2006).

Le langage est une information multisensorielle en soi qui se compose d'une information auditive, la voix et d'une information dynamique visuelle, le mouvement labial. Dans des paradigmes de *speech in noise* (voir section 1.2.1), les sujets TSA bénéficient moins de voir le mouvement des lèvres lors d'une tâche de discrimination langagière (Newman et al., 2021; Smith & Bennetto, 2007). Les études sur l'effet McGurk (voir section 1.2.1) ont généralement mis en évidence une diminution de l'influence de la vision sur l'audition chez les sujets TSA (Bebko et al., 2014; Gelder et al., 1991; Irwin et al., 2011; Mongillo et al., 2008; Stevenson, Siemann, Schneider, et al., 2014; mais voir Iarocci et al., 2010; Stevenson, Baum, et al., 2017; Stevenson, Siemann, Woynaroski, et al., 2014; Williams et al., 2004). Des études ont observé que ces différences dans l'IMS d'informations de nature linguistique semblaient se normaliser chez l'adulte TSA, possiblement en lien avec le développement (Fuxe et al., 2015; Keane et al., 2010; Saalasti et al., 2012; Taylor et al., 2010). Finalement, une récente méta-analyse portant sur l'ensemble des paradigmes expérimentaux testant l'IMS dans le TSA (Feldman et al., 2018) a mis en évidence une corrélation entre les capacités d'IMS évaluées à partir de stimuli de nature linguistique et la sévérité de la symptomatologie du TSA. Plus précisément, une intégration audiovisuelle accrue dans le TSA était associée à de meilleures capacités de langage et/ou à une réduction de la sévérité des symptômes.

Cependant, il est possible que les difficultés d'intégration multisensorielle de telles informations soient engendrées par la nature sociale des stimuli et non par un défaut d'IMS en soi. Afin de tester l'origine sensorielle des différences d'IMS, il est nécessaire d'utiliser des stimuli simples et dépourvus de contenu social. Trois approches ont été utilisées pour étudier l'IMS d'informations non sociales dans le TSA et ont généré des résultats mitigés.

Premièrement, afin de tester la dimension temporelle de l'IMS, la fenêtre temporelle d'IMS (voir section 1.2.1) a été explorée et s'est révélée être significativement plus large chez les participants TSA (e.g., Kwakye et al., 2011; Noel et al., 2018; Woynaroski et al., 2013). Globalement, ces études ont suggéré que les individus TSA perçoivent des stimuli visuels et auditifs appariés comme provenant du même événement sur des intervalles de temps plus longs que les individus non-TSA (i.e., les individus TSA signalent la simultanéité même lorsque les stimuli sont substantiellement asynchrones). En quoi l'élargissement d'une telle fenêtre pourrait générer des difficultés au quotidien ? La relation temporelle entre deux entrées sensorielles est un indice important pour savoir si ces entrées doivent être liées. Lorsque la perception de cette relation temporelle est moins précise, la synchronisation temporelle subjective devient aberrante. La liaison de stimuli sur des intervalles temporels plus longs est ainsi susceptible

d'entraîner la création de représentations perceptives multisensorielles inadaptées ou floues, dans lesquelles l'identité du stimulus est ambiguë pouvant ainsi générer des comportements inadaptés (voir la revue de Wallace & Stevenson, 2014b).

Deuxièmement, l'illusion flash-beep (voir section 1.2.1). Cette illusion a été rapportée comme étant affaiblie chez les personnes TSA (Foss-Feig et al., 2010), suggérant des atypies dans les interactions audiovisuelles. Ainsi, l'audition influencerait moins la vision dans le TSA mais demeure néanmoins un résultat controversé, Keane et al. (2010) retrouvant des résultats similaires entre le groupe contrôle et TSA.

Troisièmement, des résultats équivoques peuvent également être retrouvés concernant la facilitation multisensorielle dans des tâches de détection. Plusieurs études utilisant une tâche simple de détection de stimuli auditifs, visuels ou audiovisuels ont été développées dont l'objectif était de caractériser les corrélats neuronaux de l'IMS dans le TSA à l'aide d'enregistrements EEG. Leurs résultats comportementaux seront détaillés ici et les résultats neurophysiologiques seront développés dans la section 1.3.3 de ce manuscrit. Les études de Brandwein et collaborateurs (Brandwein et al., 2013, 2015) chez des participants de ~7 ans à 16 ans ont mis en évidence la présence d'une facilitation multisensorielle chez l'ensemble des participants, c'est-à-dire des temps de réaction plus courts dans la condition audiovisuelle par rapport aux conditions visuelles et auditives. Cependant, les temps de réaction en condition audiovisuelle n'excédaient pas les valeurs prédites du modèle de Miller pour les participants TSA (voir Figure 11). Stefanou et al. (2020) n'ont quant à eux retrouvé aucune différence dans les mesures d'IMS chez des participants TSA et contrôles âgés de 11 ans à 14 ans, que ce soit au niveau des moyennes de temps de réaction et du modèle de Miller, qui a manifesté des violations du ~5ème percentile au 50ème percentile chez l'ensemble des participants. Enfin, Dwyer et al. (2022) ont étudié l'intégration audiovisuelle (bimodale) mais aussi d'informations auditives, visuelles et tactiles (trimodale) chez des participants âgés de 11 ans à 14 ans. Une facilitation multisensorielle équivalente entre les sujets TSA et contrôles a été retrouvée ainsi qu'une absence de violation du modèle de la course pour l'ensemble des participants que ce soit dans la condition bimodale ou trimodale. Il est important d'ajouter ici que malgré une absence de différence significative des mesures d'IMS entre les groupes, des différences au niveau neurophysiologique de l'IMS ont été systématiquement mises en évidence au sein de ces études (voir section 1.3.3).

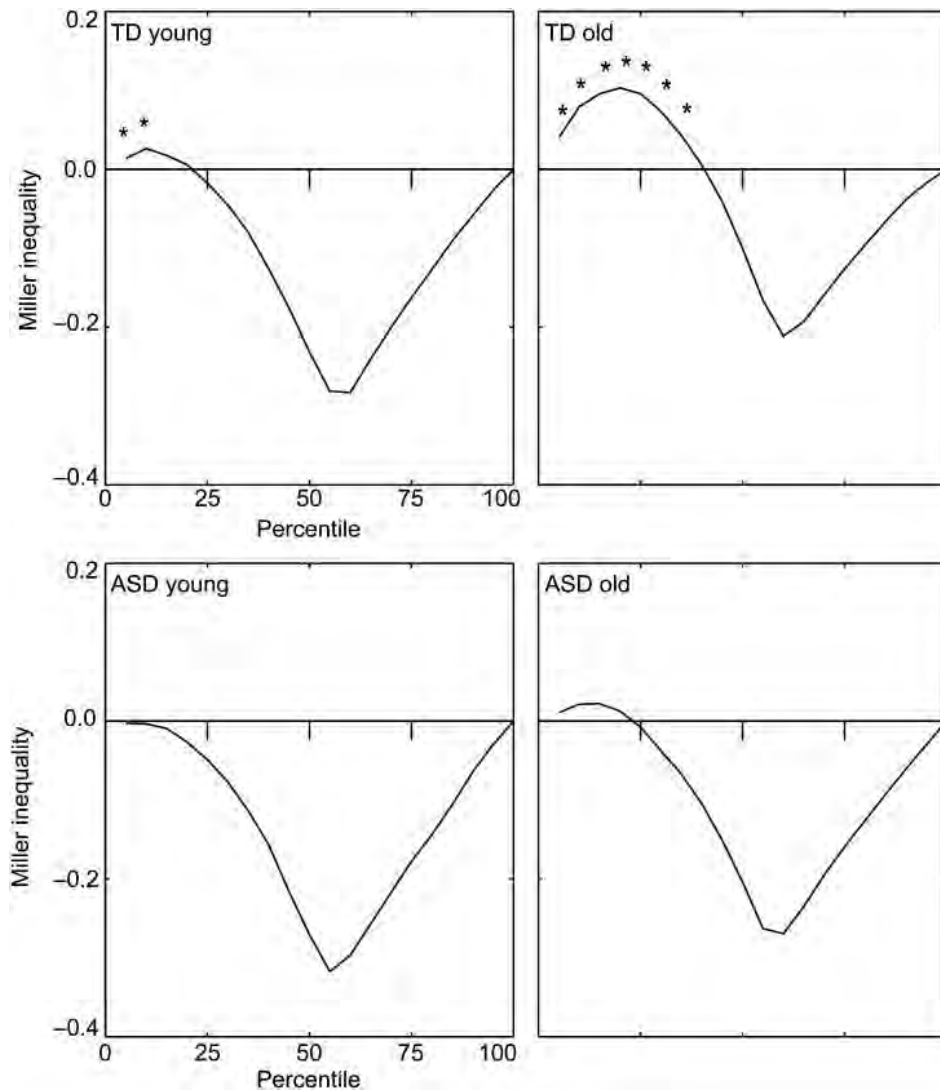


Figure 11. Les valeurs d'inégalité de Miller sont présentées pour les sujets contrôles (TD) et les sujets TSA (ASD) selon l'âge des participants : à gauche pour le groupe ayant entre 7 ans et 10 ans et à droite pour le groupe ayant entre 11 ans et 16 ans. Les astérisques indiquent une violation statistiquement significative du modèle. Issue de *Brandwein et al. (2013)*.

D'autres études comportementales, sans enregistrement EEG, ont également été menées. Ostrolenk et al. (2019) ont démontré, chez des participants de 13 à 29 ans, une absence de violation du modèle de course chez les sujets TSA, contrairement aux sujets contrôles qui présentaient des violations du 5^{ème} au 55^{ème} percentile. Des résultats similaires ont été retrouvés dans l'étude de Ainsworth et al. (2021) dans laquelle les auteurs ont travaillé avec deux groupes d'âge : de 6 à 14 ans et de 15 à 29 ans. Les auteurs ont mis en évidence chez les sujets TSA, une absence de violation du modèle de course alors que les sujets contrôles ont présenté des violations du 5^{ème} au 45^{ème} percentile dans le groupe de 6 à 14 ans, qui augmentaient avec l'âge pour atteindre le 75^{ème} percentile dans le groupe plus âgé. D'autres paradigmes expérimentaux ont également été utilisés pour étudier l'IMS à partir d'informations simples dans le TSA. Stewart et al. (2016) ont développé une tâche de détection d'informations auditives (son grave ou son aigu), visuelles (point apparaissant en haut de l'écran ou en bas de l'écran) ou audiovisuelles (son grave associé à un point en bas de l'écran ou son aigu associé à un point en haut de l'écran). Les participants appuyaient sur une touche correspondante aux stimuli (touche du haut ou touche du bas selon les stimuli). Les auteurs ont mis en évidence chez des participants âgés de 8 à 18 ans, une facilitation multisensorielle dans les temps de réaction pour l'ensemble des participants mais aucune violation du modèle de Miller. Enfin, Collignon et al. (2013) ont évalué, chez des sujets âgés de 14 à 31 ans, les bénéfices comportementaux lorsqu'un indice auditif est présenté de manière synchrone avec le changement de couleur d'une cible visuelle entourée de distracteurs. Le « pip » auditif synchrone avec l'information visuelle augmente généralement l'efficacité de la recherche de la cible (*pip-and-pop effect* ; Van der Burg et al., 2008). Ce bénéfice comportemental s'est observé uniquement chez les sujets contrôles.

Peu d'études se sont intéressées à l'intégration multisensorielle selon les traits de personnalité autistique dans la population générale et les rares existantes se sont majoritairement focalisées sur la fenêtre temporelle d'IMS. En utilisant une tâche de jugement de simultanéité (Donohue et al., 2012) ou la tâche d'illusion flash-bip (Yaguchi & Hidaka, 2018), ces études ont mis en évidence que plus le participant présentait de traits autistiques élevés, plus la fenêtre temporelle d'IMS était large. En outre, une étude récente (van Laarhoven et al., 2019) utilisant des stimuli sociaux (stimuli auditif et visuel de la parole) dans un paradigme impliquant plusieurs tâches d'IMS a révélé qu'un score à l'AQ élevé était lié à une sensibilité réduite à l'illusion de *McGurk* ainsi qu'à des bénéfices comportementaux réduits dans la tâche *speech-in-noise*. L'ensemble

de ces résultats semble aller dans le sens de ceux retrouvés dans le TSA mais sont insuffisants pour comprendre comment s'exprime l'IMS selon les traits de personnalité autistique.

Aucune étude portant sur l'intégration multisensorielle du mouvement en profondeur dans le TSA n'a été développée, à notre connaissance. Une seule et récente étude a porté sur le mouvement en profondeur dans le TSA à partir de la modalité visuelle (Hu et al., 2017). Cette étude investissant des analyses comportementales chez l'animal et l'homme, mais aussi des explorations cérébrales, par des approches de biologie cellulaire chez l'animal et de neuroimagerie chez l'homme, avait l'objectif d'étudier les réponses défensives induites par la présentation d'une information en approche menaçante dans le TSA. Plus précisément, l'objectif des auteurs était d'étudier la voie sous-corticale Colliculus Supérieur (CS) → Noyau Postérieur Latéral (NPL) → Amygdale Basolatérale (AB) dans le modèle de la souris TSA et la voie équivalente chez l'homme Colliculus Supérieur (CS) → Pulvinar (P) → Amygdale (A) chez de jeunes enfants TSA ayant entre 3 ans et 4 ans. Cette voie a été communément associée à des réponses défensives face à un stimulus menaçant (Almeida et al., 2015; LeDoux, 2000; Tamietto & de Gelder, 2010; Vuilleumier et al., 2003; Wei et al., 2015). Les modèles de souris TSA ont manifesté moins de réponses défensives (i.e., des comportements de fuite) lorsqu'une information en approche était présentée (un disque noir en expansion), comparativement aux souris non-TSA qui ont toutes présentées des comportements de fuite. À l'aide de techniques de traçage du virus de la rage dans les voies nerveuses, les auteurs ont mis en évidence que les connexions synaptiques dans la voie CS→NPL→AB étaient anormales chez les souris TSA dont les réponses défensives étaient absentes. Concernant les enfants TSA, les auteurs leur ont diffusé sur un écran l'animation d'un rocher qui approche, donnant l'impression aux enfants de chuter sur celui-ci. En analysant les comportements défensifs (fuite, *freezing*, se cache, se raidit etc.), les auteurs ont mis en évidence que 69.7 % des sujets TSA (23/33) ne présentaient aucun comportement défensif. En utilisant l'imagerie en tenseur de diffusion, les résultats ont montré que les connexions structurelles de la voie CS→P→A étaient plus faibles chez les enfants TSA ne présentant pas de comportements défensifs, transposant les résultats chez l'animal à l'homme. Cette étude (Hu et al., 2017), avec toutes les limites éthiques qu'elle contient, demeure néanmoins une preuve préliminaire que les sujets TSA pourraient présenter des difficultés à traiter le mouvement en profondeur.

En somme, la littérature semble s'accorder sur des difficultés d'intégration multisensorielle lorsque des stimuli sociaux sont utilisés dans le TSA, qui seraient corrélées à la sévérité de la symptomatologie. Néanmoins, il est crucial de développer le pan de la littérature investissant l'IMS à partir d'informations simples et non-sociales, dont les résultats s'affranchissent d'un défaut du traitement de l'information sociale pouvant et ayant pu guider les différences intergroupes. Cela permettra de caractériser au mieux l'IMS qui reste encore mal comprise dans le TSA et dans la personnalité autistique de sujets non-TSA. Concernant l'intégration multisensorielle du mouvement en profondeur dans le TSA, une seule étude a été développée à partir d'informations unisensorielles visuelles et soutient notre intérêt de travailler sur un tel sujet en révélant des hyporéactivités comportementales des sujets TSA lorsqu'un stimulus en approche était présenté, associées à un défaut d'activation d'un réseau cérébral communément impliqué dans une réponse de peur face à un stimulus menaçant.

1.2.5 Résumé

- ❖ **L'intégration multisensorielle (IMS) permet de combiner des informations provenant de différentes modalités sensorielles en percepts unifiés.** Elle est essentielle dans notre **monde dynamique et multisensoriel** avec lequel nous sommes sans cesse en interaction. Les capacités d'IMS peuvent être **quantifiées à partir des temps réaction**, faisant des paradigmes expérimentaux de détection une approche idéale pour étudier l'IMS.
- ❖ Il existe des **interactions spécifiques entre l'IMS et le mouvement en approche** qui s'expriment notamment par des **temps de réaction réduits**.
- ❖ Bien que **les nouveau-nés semblent présenter des capacité d'IMS**, **l'expérience sensorielle est néanmoins nécessaire dans le développement de l'IMS, qui s'étend au moins jusqu'à adolescence.**
- ❖ **Les résultats concernant l'IMS dans le TSA sont mitigés** et mettent en évidence la nécessité d'investiguer une telle intégration avec des informations simples et non-sociales **dans l'ensemble du spectre autistique.** De plus, **aucune donnée n'existe concernant l'IMS du mouvement en profondeur dans le TSA.**

1.3 Apports de la neurophysiologie

1.3.1 La neurophysiologie et l'intégration multisensorielle

Cette section du manuscrit parcourra dans un premier temps les bases anatomiques et fonctionnelles de l'intégration multisensorielle pour nous apprendre que nous la retrouvons à tous les niveaux de traitement de l'information, notamment au niveau des aires sensorielles primaires. Dans un second temps, l'électro-encéphalographie sera présentée, technique qui a été utilisée dans le travail de cette thèse. Nous verrons comment l'appliquer dans l'analyse de l'IMS ainsi que les principaux résultats chez l'homme qui ont contribué à la modélisation actuelle de l'IMS. Enfin, nous parcourons les résultats des études ayant exploré l'intégration multisensorielle dans le TSA.

À la fin des années 1960 et dans les années 1970, il était largement admis que l'intégration multisensorielle progressait des cortex sensoriels primaires aux cortex sensoriels secondaires, jusqu'aux régions de cortex « d'association » ou « hétéromodales », faisant du premier modèle de l'IMS, un modèle hiérarchique et unidirectionnel. Plus concrètement, les informations sensorielles étaient d'abord traitées dans leurs aires sensorielles primaires respectives, puis elles convergeaient vers des régions hétéromodales afin d'être intégrées entre elles (Meredith, 2002; Stein & Meredith, 1993). Ces régions dites « hétéromodales » définissaient des régions cérébrales recevant des afférences convergentes de plusieurs modalités sensorielles qui contenaient des neurones sensibles à la stimulation de plus d'une modalité. Un grand nombre de ces zones ont ainsi été mises en évidence (voir Figure 12). Des zones de convergence multisensorielle ont également été identifiées dans des structures sous-corticales, notamment le colliculus supérieur (Fries, 1984), le claustrum (Pearson et al., 1982), le noyau cochléaire (Heeringa et al., 2018) et les noyaux supra-géniculés ainsi que le pulvinar médian du thalamus (Cappe, Morel, et al., 2009; Mesulam & Mufson, 1982; Mufson & Mesulam, 1984; Vittek et al., 2022). Cependant, des études ont montré qu'il existait des interactions entre différentes aires du traitement sensoriel dès les cortex primaires ouvrant un débat entre les modèles tardifs et précoces de l'intégration multisensorielle. C'est-à-dire que des preuves de plus en plus conséquentes ont émergé en faveur d'IMS dans certaines régions du cerveau traditionnellement connues pour être unisensorielles dans leur nature et leur fonction (Calvert, 2001; Ghazanfar et al., 2005; Kayser et al., 2005; Martuzzi et al., 2007; Wang et al., 2008). Par exemple, des projections directes d'aires corticales auditives ont été mises en évidence dans les aires visuelles, dont V1 (Ettlinger, 1990; Rockland & Ojima, 2003). D'autres auteurs (Schroeder et al., 2001; Schroeder & Foxe, 2002) ont observé des réponses d'intégration multisensorielle à

des informations somatosensorielles, visuelles et auditives dans le cortex auditif. Les résultats de Cappe & Barone (2005) ont montré des projections visuo-somatosensorielles provenant des aires visuelles ainsi que des projections somatosensorielles vers le cortex auditif. L'ensemble de ces résultats a ainsi amené la communauté scientifique à envisager que l'intégration multisensorielle pourrait être réalisée à différents niveaux de la hiérarchie du traitement cortical (voir Figure 13). Ainsi, l'IMS se produirait à la fois aux stades précoces et tardifs du traitement de l'information (voir les revues de Calvert & Thesen, 2004; Cappe, Rouiller, et al., 2009; Ghazanfar & Schroeder, 2006).

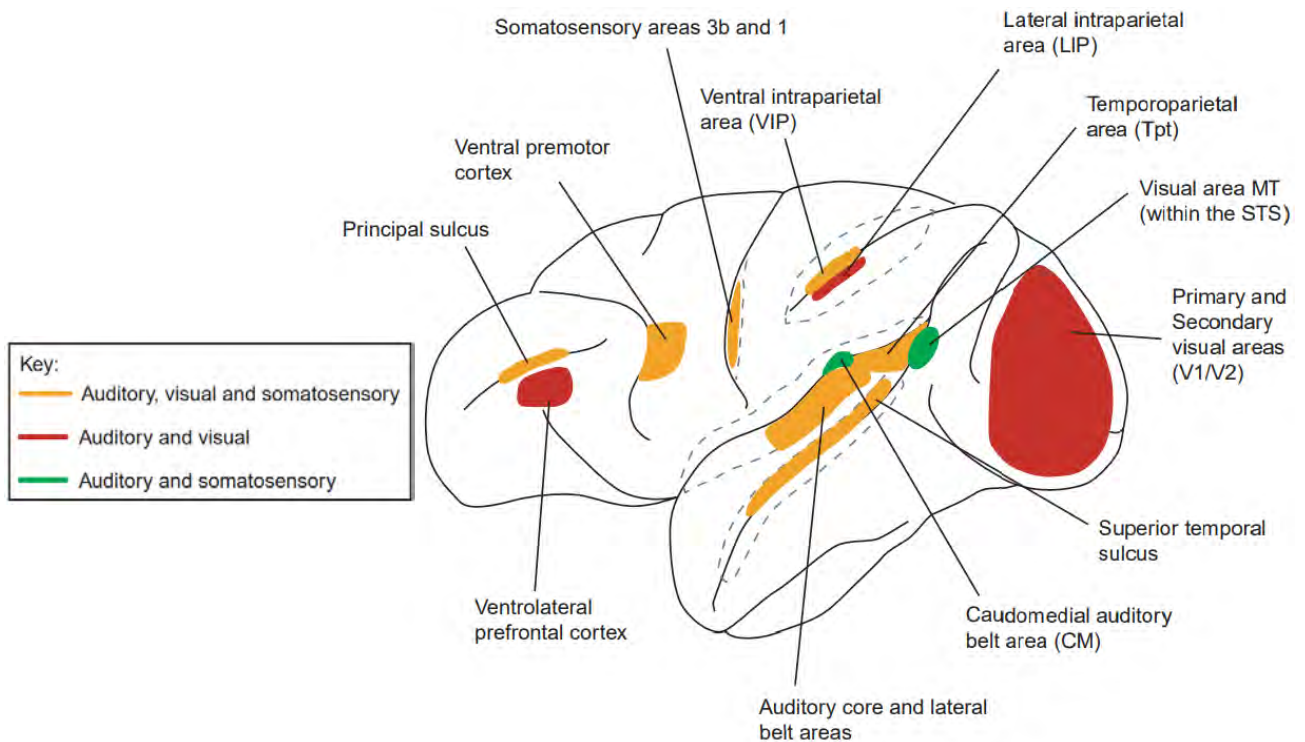


Figure 12. Zones cérébrales identifiées comme étant multisensorielles chez le primate non-humain. Issue de Ghazanfar & Schroeder, 2006.

Au niveau neuronal, trois règles de l'intégration multisensorielle ont été proposées à partir d'enregistrements électrophysiologiques intracérébrales de neurones au niveau du colliculus supérieur et du cortex antérieur ectosylvien chez l'animal (Stein & Meredith, 1993). Les réponses neuronales aux stimuli multisensoriels ont tendance à être renforcées lorsque les stimuli des différents sens proviennent approximativement du même endroit (la « règle spatiale »), lorsqu'ils surviennent approximativement au même moment (la « règle temporelle ») et lorsqu'au moins un des deux stimuli n'est que faiblement efficace pour exciter un neurone (la « règle de l'efficacité inverse »).

La règle spatiale est liée à l'organisation fonctionnelle des colliculi supérieurs qui alignent les cartes spatiales de différentes modalités sensorielles de manière similaire : Les stimuli multisensoriels provenant d'un endroit donné de l'espace sont représentés à un endroit donné au niveau des colliculi. Les yeux ne peuvent être orientés que dans une seule direction, de sorte que la représentation de la même région de l'espace à travers différents sens au niveau du colliculus aiderait les neurones individuels à intégrer des informations sur la région de l'espace actuellement la plus stimulée et probablement la plus importante. En d'autres termes, l'endroit où nous avons entendu un vase se briser sur le sol est également l'endroit qui doit être regardé. La règle temporelle stipule qu'une synchronie des stimuli unisensoriels engendre une meilleure intégration multisensorielle. En effet, les informations provenant de différents sens et apparaissant approximativement au même moment proviennent très probablement du même événement physique. En effet, « approximativement » car nous avons vu précédemment qu'il existe une fenêtre temporelle de l'IMS hautement adaptative qui permet d'intégrer des informations non synchrones de plusieurs millisecondes en percept multisensoriel.

La règle de l'efficacité inverse indique que l'activité neuronale en condition multisensorielle est plus importante lorsque les stimuli unisensoriels sont faiblement détectables (peu saillants) (voir la revue de Holmes & Spence, 2005).



Figure 13. Les connexions cortico-corticales entre différentes aires sensorielles font partie du modèle actuel de l'intégration multisensorielle. Issue de *Cappe, Rouiller et Barone (2009)*.

Les études électrophysiologiques de l'intégration multisensorielle, dont certaines ont été présentées ci-dessus, sont invasives par nature et ont été réalisées majoritairement dans des modèles animaux. Chez l'homme, le besoin de méthodes non invasives a conduit à l'utilisation de l'électro-encéphalographie (EEG) afin d'investir au mieux les bases fonctionnelles de l'IMS. L'EEG est outil privilégié² des neurosciences (Cohen, 2011), notamment pour l'étude de l'intégration mutlisensorielle et a largement contribué au modèle actuel de celle-ci. Pour commencer, de quoi parlons-nous ? L'EEG est une technique indolore non-invasive et non-lésionnelle (voir Figure 14A) fournissant une mesure des champs électriques générés par l'activité neuronale. La communication neuronale se manifeste par une propagation de signaux électriques issus d'activités biochimiques (passages sélectifs d'ions, agents neurotransmetteurs). Les courants électriques créés par une population de neurones diffusent à travers des milieux de conductivité variable (tissu cérébral, liquide céphalo-rachidien, os) et donnent naissance à des variations de potentiel électrique enregistrables à la surface du crâne. Les signaux EEG sont censés refléter l'activation synchrone de populations neuronales et plus précisément les courants transmembranaires post-synaptiques au niveau des dendrites de cellules pyramidales (Buzsáki et al., 2012 ; voir Figure 14B). Ces cellules sont orientées en fonction de la structure anatomique (gyri et sulci). Par exemple, l'EEG détecte les courants radiaux à la surface mais aussi les courants tangentiels (voir Figure 14B) et peut être sensible aux sources profondes. La transmission du courant neuronal à travers le cerveau et vers les électrodes est pratiquement instantanée, ce qui confère à l'EEG une résolution temporelle de l'ordre de la milliseconde. Il est important d'ajouter que les signaux EEG constituent toujours une différence de potentiel électrique. En effet, les valeurs de potentiel électrique à chaque électrode sont en fait des mesures relatives. Plus précisément, la mesure du microvolt à chaque électrode est la différence de potentiel électrique à cette électrode, par rapport à une électrode de référence.

² En positionnant les techniques non-invasives d'enregistrement de l'activité cérébrale dans la balance entre résolution spatiale et temporelle, la magnétoencéphalographie et l'imagerie spectroscopique proche infrarouge fonctionnelle représentent le meilleur compromis. Mais la première est associée aux contraintes expérimentales et économiques, les plus importantes et la seconde a un champ d'application limité aux structures cérébrales les moins profondes (voir la revue de Shibasaki, 2008 ; Hervault, 2021).

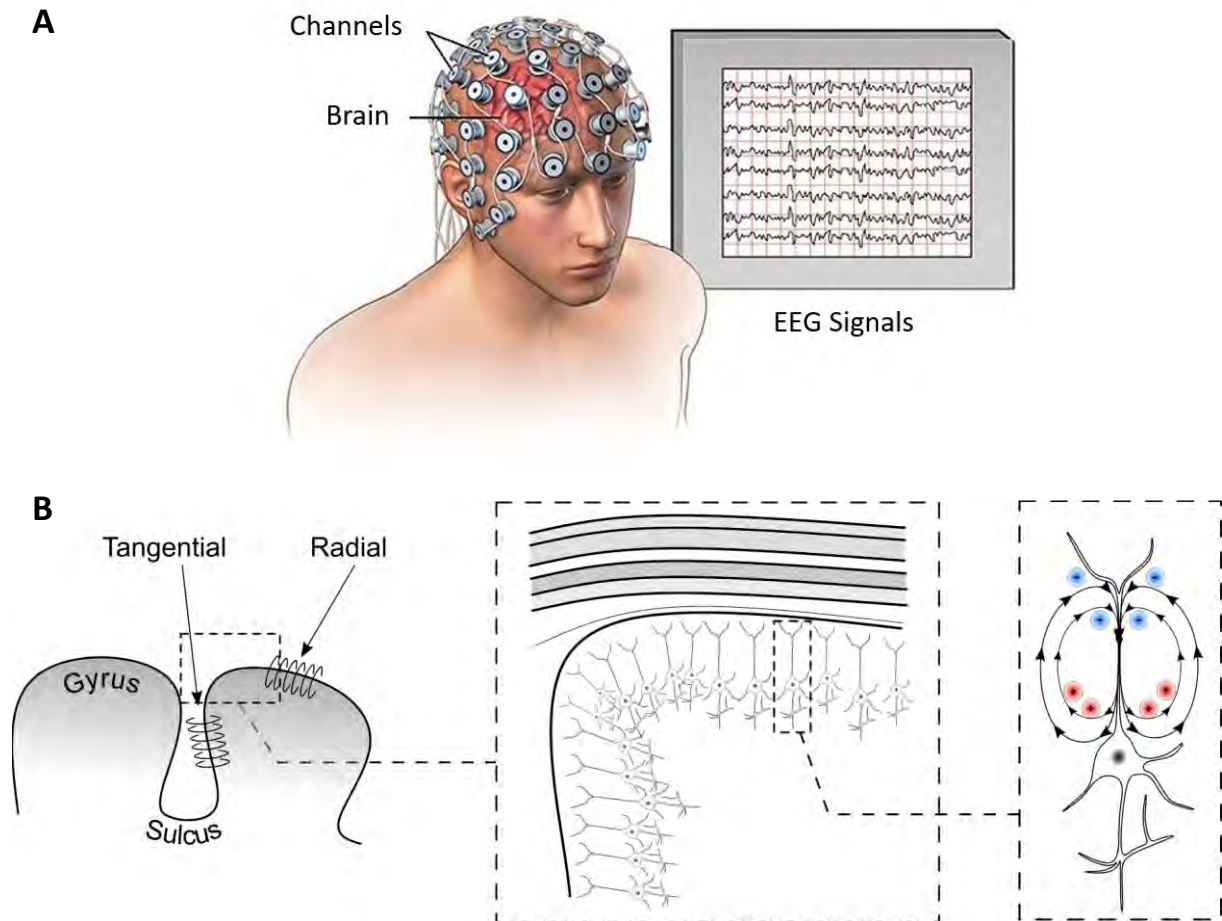


Figure 14. **A.** L'électro-encéphalographie permet d'enregistrer les signaux électriques issus du cerveau à partir d'électrodes posées sur un bonnet ajusté à la taille de tête du participant. **B.** A gauche : représentation du cortex (gyrus et sulcus) et des sources (radiales ou tangentielles). A droite : organisation des cellules pyramidales qui sont situées perpendiculairement à la surface du cortex.

Tout événement, perceptuel, moteur ou cognitif, peut provoquer une modification de l'activité électrique cérébrale dans différentes populations de neurones. Ces variations ou ERPs (i.e., *Event-Related Potentials*) ont une latence relativement stable par rapport à la présentation de l'évènement mais sont généralement de très faible amplitude (de l'ordre de quelques microvolts) par rapport à l'activité électrique spontanée. Elles sont par conséquent noyées dans le « bruit de fond » de l'EEG. Chez l'homme, l'extraction de ces réponses électriques spécifiquement liées à une stimulation est attribuée à Davis et al. (1939). Le principe est le suivant : le stimulus responsable de la variation électrique est répété plusieurs fois et les segments d'EEG calés sur chaque stimulation (synchronisation sur l'évènement) sont moyennés entre eux. L'activité spontanée aléatoire s'atténue fortement tandis que la réponse spécifique évoquée par le stimulus se dégage du « bruit » physiologique (Guérit, 1993; voir Figure 15). Les ERPs présentent trois avantages principaux. Premièrement, ils sont simples et rapides à calculer. Le deuxième avantage est leur grande précision temporelle, l'estimation de l'activité électrique à chaque milliseconde étant très précise. Le troisième avantage des ERPs est qu'il existe une littérature abondante de plusieurs décennies sur les résultats des ERPs à partir de laquelle nous pouvons contextualiser et interpréter nos résultats. De plus, cette littérature et les théories qui ont été développées autour des résultats des ERPs offrent de nombreuses opportunités de générer des hypothèses nouvelles et testables (Cohen, 2011). Néanmoins, les ERPs présentent deux limites principales. La première est liée à la potentielle perte d'informations lors du moyennage du signal. La deuxième limite est que les ERPs ne révèlent qu'une faible partie des informations présentes dans les données EEG. En d'autres termes, il existe de nombreux types de dynamiques dans les données EEG qui n'ont pas de représentation dans l'ERP. En outre, les ERPs offrent peu de possibilités de relier les résultats aux mécanismes physiologiques. Cela est dû au fait que les mécanismes neurophysiologiques qui produisent les ERPs sont moins bien compris par rapport aux mécanismes neurophysiologiques qui produisent les oscillations, par exemple (Cohen, 2011).

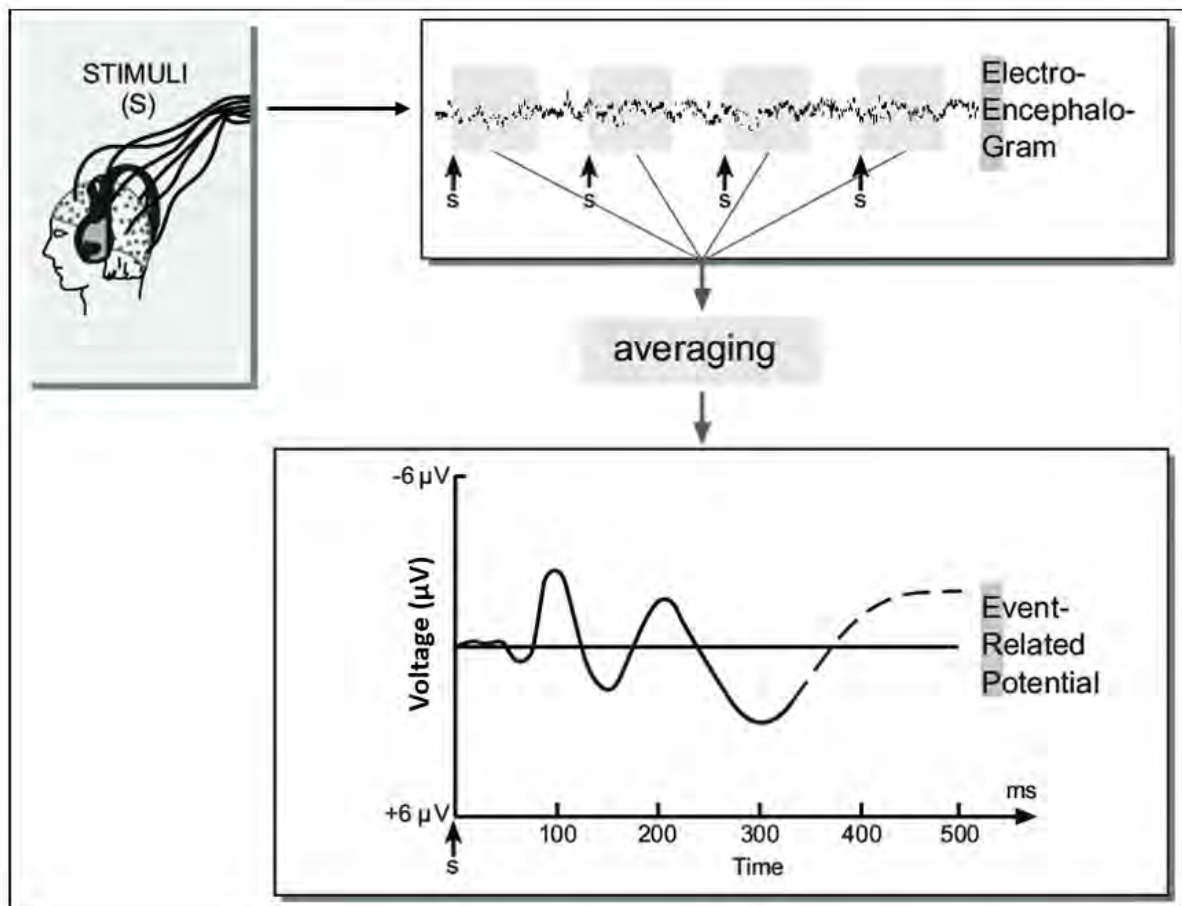


Figure 15. De l'enregistrement des signaux EEG au calcul des ERPs. Adaptée de *Hasting (2022)*.

La latence et l'amplitude sont des paramètres des ERPs qui sont généralement étudiés pour décrire la vitesse de traitement ainsi que la force de la réponse neuronale, respectivement. Appliquer à l'étude de l'IMS, l'intérêt est de tester quand (à quelle latence) et où (à quelle électrode) des effets multisensoriels ont lieu. Pour cela, un modèle de l'IMS dans l'analyse des données EEG a été proposé : le modèle additif (Barth et al., 1995; Berman, 1961). Les ERPs mesurent directement les champs électriques générés par l'activité neuronale qui, par nature, s'additionnent linéairement. Ainsi, le modèle additif propose que les populations neuronales répondant uniquement aux stimuli unisensoriels, soit visuel, soit auditif, ne répondent pas de manière spécifique aux stimuli multisensoriels. Ainsi, leur contribution à l'ERP_{AV} (l'ERP dans la condition audiovisuelle) correspond à la somme linéaire de leurs contributions à l'ERP_V (ERP dans la condition visuelle) et à l'ERP_A (ERP dans la condition auditive). Ainsi, la somme ERP_V + ERP_A peut être soustraite de l'ERP_{AV} pour obtenir un complexe de forme d'onde de différence [ERP_{AV}-(ERP_A+ERP_V)]. Les réponses multisensorielles supérieures (i.e., des valeurs d'onde de différence positives) ou inférieures (i.e., des valeurs d'onde de différence négatives) à la somme des conditions unisensorielles sont qualifiées de réponses non-linéaires. Ces réponses non-linéaires sont interprétées comme des indices d'intégration multisensorielle.

Un autre outil est également disponible pour étudier les données EEG au niveau topographique et a été particulièrement investigué dans l'étude de l'IMS : le GFP (i.e., *Global Field Power*). Cette mesure a été introduite pour la première fois par Lehmann & Skrandies (1980) et correspond à la moyenne quadratique des valeurs moyennes des électrodes à un instant donné. Plus simplement, le GFP est l'écart type de toutes les électrodes à un instant donné. La forme d'onde du GFP résultante est une mesure du potentiel en fonction du temps et reflète la force de la réponse neuronale aux stimuli. Le principal avantage du GFP est qu'il constitue une mesure unique, indépendante de la référence, à l'inverse des ERPs qui sont substantiellement une différence de potentiel électrique à chaque électrode par rapport à une électrode référence (voir la revue de Murray et al., 2008).

Formule du GFP :

$$GFP_u = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n u_i^2}$$

$$GFP_u = \sigma_u$$

A partir du GFP, nous pouvons calculer un indice de dissimilarité (*global dissimilarity* ; DISS) qui correspond à la différence entre deux champs électriques, indépendamment de leur force. Simplement, il correspond à la différence de deux GFP normalisés.

Formule du DISS :

$$DISS_{u,v} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{u_i}{GFP_u} - \frac{v_i}{GFP_v} \right)^2}$$
$$DISS_{u,v} = \sqrt{2 \cdot (1 - C_{u,v})}$$

Bien que le premier modèle d'analyse des données électrophysiologiques pour étudier l'IMS ait été proposé il y a plusieurs décennies, la littérature offre peu d'études qui explorent les effets intégratifs à partir de données EEG. Celles-ci montrent généralement au niveau des ERPs des effets non-linéaires dès ~50 ms après la présentation des stimuli. Ces effets, ayant notamment été mis en évidence pour des électrodes au niveau de cortex sensoriels et à des latences précoces post-stimulus, ont fourni des preuves en faveur d'une intégration des informations sensorielles dès ces régions corticales. Le paragraphe suivant présentera les résultats d'études menées sur l'IMS d'informations non-sociales. Notez que toutes ces études ont été conduites chez des adultes.

Les travaux pionniers de Giard & Peronnet (1999) ont montré des effets non-linéaires précoces en condition audiovisuelle, les réponses dans cette condition étant supérieures à la somme des réponses unisensorielles. Plus concrètement, en utilisant une tâche de discrimination de cibles auditives, visuelles et audiovisuelles, les résultats ont mis en évidence plusieurs périodes d'interaction qui ont pu être dissociées temporellement et topographiquement dans les 200 ms post-stimulus. Celles-ci se retrouvaient au niveau des aires visuelles postérieures de 40 à 90 ms, 110 à 145 ms et 155 à 200 ms ; au niveau des aires temporocentrales vers 95 et 180 ms et au niveau frontotemporal droit de 140 à 165 ms. Les auteurs se sont par ailleurs intéressés à l'effet de dominance sensorielle des participants. Pour cela, les participants ont été séparés en deux groupes à partir de leurs temps de réaction dans les conditions unisensorielles. Un groupe de participants à dominance visuelle (TR visuel < TR auditif) et un groupe de participants à dominance auditive (TR auditif < TR visuel) ont été proposés. Les résultats ont montré que le groupe à dominance visuelle présentait des patterns d'interactions significatifs entre 40 et 140 ms post-stimulus dans les aires visuelles postérieures. Le groupe à dominance auditive présentait quant à lui des interactions significatives entre 90 et 105 ms post-stimulus dans les régions temporales. Quelques années plus tard, les auteurs ont développé une étude utilisant un paradigme expérimental similaire mais en ajoutant des conditions audiovisuelles incongruentes afin de tester la présence d'interactions intégratives lorsque les conditions unisensorielles prises isolément ne permettent pas de prédire l'identité de l'information multisensorielle (Fort et al.,

2002). Les mesures comportementales n'ont montré aucun signe de facilitation multisensorielle. Cependant, l'analyse des ERPs a révélé des effets non-linéaires dans des zones corticales spécifiques et non spécifiques aux sens, qui dépendaient en partie de la dominance sensorielle des sujets. Plus précisément, ces effets sont apparus entre 120 et 145 ms au niveau frontal et entre 160 et 195 ms au niveau temporal. En considérant la dominance sensorielle des participants, des interactions neuronales au niveau d'aires visuelles postérieures entre 140 et 185 ms, ont été retrouvées uniquement chez les sujets à dominance auditive. En revanche, les sujets à dominance visuelle ont présenté des effets d'interaction étendus à plusieurs régions corticales entre 120 et 145 ms. Teder-Sälejärvi et al. (2002), en utilisant une tâche d'identification simple, ont retrouvé au niveau comportemental, une facilitation multisensorielle des TR et au niveau des ERPs, des effets non-linéaires précoces entre 20 et 30 ms au niveau frontocentral et entre 30 et 40 ms au niveau pariétal puis plus répandus entre 160 et 170 ainsi qu'entre 230 et 260 ms. Molholm et al. (2002) ont retrouvé des facilitations comportementales à partir d'une tâche de détection simple et au niveau des ERPs, des effets intégratifs au niveau pariéto-occipital ainsi qu'au niveau temporal entre 45 et 80 ms et au niveau frontocentral à 120 ms ainsi qu'à 180 ms. Vidal et al. (2008) ont investi quant à eux une tâche passive et ont mis en évidence des effets non-linéaires entre 55 et 95 ms ainsi qu'entre 150 et 195 ms au niveau frontocentral. Des effets intégratifs ont également été retrouvés au niveau occipital mais à des latences plus tardives (entre 170 et 198 ms ainsi qu'entre 245 et 350 ms). Cappe et al. (2010) à partir d'une tâche de détection d'information audiovisuelle de type Go/NoGo ont analysé les réponses de type NoGo pour s'affranchir de la réponse motrice dans les données et ont retrouvé des effets non-linéaires au niveau pariéto-occipital dès 50 ms. L'analyse du GFP a mis en évidence des modulations de la force de la réponse neuronale dans plusieurs fenêtres de temps : entre 70 et 90 ms, 115 et 134 ms ainsi qu'entre 148 et 173 ms. Brandwein et al. (2011) ont retrouvé une facilitation multisensorielle des TR dans une tâche de détection mais n'ont pas observé d'effets intégrateurs précoces (< 100 ms). Les résultats des auteurs ont mis en évidence des effets intégratifs au niveau frontal entre 100 et 120 ms ainsi qu'au niveau pariétal entre 100 et 150 ms et des effets étendus à plusieurs zones corticales entre 190 et 240 ms. Notons que les auteurs ont trouvé un lien entre les valeurs d'inégalités de Miller au niveau comportemental et les valeurs d'onde de différence calculée à partir du modèle additif. Plus précisément, un lien de corrélation positif a été retrouvé entre les effets intégratifs au niveau frontal entre 95 et 138 ms et les valeurs de violation du modèle de Miller. Outre l'utilisation d'informations auditives et visuelles, deux autres études ont utilisé des informations auditives et somatosensorielles pour étudier l'IMS à partir de données EEG dont celle de Foxe

et al. (2000) qui, en utilisant une tâche passive, ont retrouvé des effets intégratifs au niveau central de 50 à 69 ms. Enfin, Sperdin et al. (2010) ont trié les ERPs aux stimuli auditifs, somatosensoriels et auditivo-somatosensoriels selon la médiane des temps réaction lors d'une tâche de détection. De cette façon, les données EEG correspondaient à des temps de réaction inférieurs à la médiane (i.e., considérés comme rapides) ou supérieurs à celle-ci (considérés comme lents). Au niveau comportemental, seuls les essais conduisant à des temps de réaction rapides ont produit une violation significative du modèle de Miller, ce qui n'était pas le cas des temps de réaction lents. Au niveau neurophysiologique, des interactions non-linéaires ont été observées sur deux périodes de temps au cours des 200 premières ms suivant l'apparition du stimulus : Au cours de la période entre 40 et 84 ms ainsi qu'entre 86 et 128 ms post-stimulus, au niveau central. Afin de tester l'effet des essais rapides et lents sur les réponses neuronales, les auteurs ont analysé le GFP et ont montré que les effets non-linéaires de la première période (40-84 ms) étaient significatifs uniquement pour les essais correspondant aux temps de réaction rapides. Au cours de la période post-stimulus de 86 à 128 ms, les effets non-linéaires ont été observées indépendamment de la vitesse des temps de réaction. Ainsi, seuls les essais avec des temps de réaction rapides ayant conduit à une violation du modèle de Miller ont également montré des effets non-linéaires précoces.

1.3.2 Corrélats neuronaux de l'IMS du mouvement en profondeur

Une seule étude a analysé des données neurophysiologiques dans l'intégration multisensorielle du mouvement en profondeur (Cappe et al., 2012), qui a largement inspirée le travail de cette thèse, en plus de l'étude de 2009 (Cappe, Thut, et al., 2009) focalisée sur l'analyse des données comportementales. Les stimuli sont détaillés dans la section 1.2.2 et variaient selon la modalité sensorielle (auditive, visuelle, audiovisuelle), le mouvement (approche, éloignement, statique) et la congruence (informations audiovisuelles congruentes ou incongruentes). Le paradigme expérimental était de type Go/NoGo : les participants appuyaient sur un bouton lorsqu'ils percevaient du mouvement. L'analyse des données ERPs a mis en évidence des effets intégratifs non-linéaires dès 68 ms pour la condition en approche audiovisuelle, 119 ms pour la condition audiovisuelle en éloignement et plus tardivement, dès 140 ms pour les conditions audiovisuelles incongruentes. Des analyses statistiques de cluster des données ERPs ont mis en évidence des périodes de topographie stable du champ électrique à la fois au sein et entre les conditions expérimentales pour les périodes de 73 à 113 ms ainsi que de 114 à 145 ms. Le GFP a été calculé dans ces périodes temporelles et a montré un effet non linéaire dans la période précoce

de 73 à 113 ms uniquement pour la condition en approche audiovisuelle, l'autre période plus tardive montrant des effets intégratifs pour l'ensemble des conditions multisensorielles (voir Figure 16). Les analyses statistiques des estimations de source ont identifié des interactions spécifiques aux stimuli d'approche multisensoriels au niveau du claustrum/insula droit s'étendant inférieurement dans l'amygdale ainsi qu'au niveau du cunéus bilatéral s'étendant au niveau inférieur et latéral du cortex occipital.

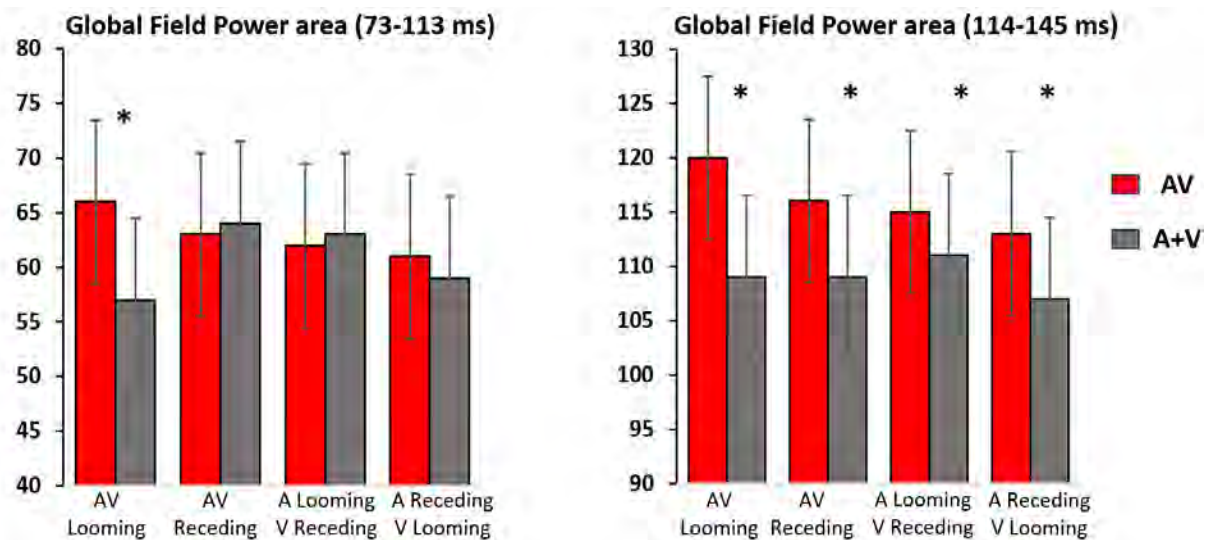


Figure 16. Intégration multisensorielle spécifique pour le mouvement audiovisuel en approche. Moyenne des valeurs du GFP entre 73 et 113 ms (à gauche) et entre 114 et 145 ms (à droite) pour les conditions audiovisuelles (en rouge) et la somme des conditions unisensorielles (en gris foncé). Adaptée de *Cappe et al. (2012)*.

1.3.3 Les données neurophysiologiques de l'intégration multisensorielle dans le TSA

Bien que l'ensemble des études explorant les corrélats neuronaux de l'IMS à partir d'informations simples et non-sociales a été mené chez des participants adultes, les travaux sur le TSA, à l'inverse, ont uniquement été portés chez des enfants. La première étude ayant exploré les corrélats neuronaux de l'intégration multisensorielle d'informations simples et non-sociales dans le TSA est celle de Russo et al. (2010). Les auteurs ont présenté des informations auditives, tactiles et audiotactiles à des sujets âgés de 6 à 16 ans qui participaient à une tâche passive. En appliquant le modèle additif, les résultats ont mis en évidence des effets non-linéaires dès 100 ms post-stimulus au niveau temporal pour les sujets TSA et contrôles. Dès 175 ms post-stimulus, les sujets contrôles ont également présenté de l'IMS sur de nombreuses régions centrales et frontales qui n'était pas retrouvée chez les sujets TSA, qui présentaient d'autres indices plus tardifs, à partir de 325 ms post-stimulus. Brandwein et al. (2013) ont utilisé une tâche de détection de cibles visuelles, auditives et audiovisuelles chez des sujets âgés de 7 à 16 ans. Les résultats ont mis en évidence des effets non-linéaires pour l'ensemble des participants entre 40 et 80 ms, entre 180 et 210 ms au niveau pariéto-occipital ainsi qu'entre 100 et 130 ms post-stimulus au niveau pariétal. Concernant cette IMS au niveau pariétal, l'amplitude de l'onde de différence du modèle additif était corrélée à la sévérité des symptômes des sujets TSA (Brandwein et al., 2015). Les sujets contrôles ont également présenté des interactions multisensorielles centrées autour de 150 ms post-stimulus sur plusieurs régions cérébrales, ce qui n'était pas le cas des sujets TSA. Molholm et al. (2020), en utilisant un paradigme expérimental similaire chez des sujets âgés de 6 à 16 ans, ont mis en évidence des effets non-linéaires à partir de 130 ms post-stimulus au niveau frontotemporal chez les sujets contrôles, absents chez les sujets TSA. A 200 ms, l'ensemble des participants ont présenté des effets non-linéaires intégratifs mais ces derniers étaient moins étendus et robustes chez les sujets TSA. Stefanou et al. (2020) ont travaillé avec des sujets de 11 à 14 ans et ont utilisé les mêmes stimuli que les précédents auteurs mais en modifiant les intervalles inter-stimuli, qui étaient déterminés à partir d'une distribution exponentielle afin d'éviter toutes réponses anticipatoires. Alors que des indices d'IMS ont été retrouvés à partir de 90 ms post-stimulus au niveau centrotemporal, suivis d'une distribution topographique étendue jusqu'à 300 ms chez les sujets contrôles, les sujets TSA ont manifesté une IMS commençant à 220 ms au niveau pariéto-occipitale évoluant vers les régions centrales à partir de 250 ms et jusqu'à 300 ms après le début du stimulus. Plus récemment, Dwyer et al. (2022) ont exploré l'intégration d'informations multisensorielles à deux modalités (auditive et visuelle) ainsi qu'à trois modalités sensorielles (auditive, visuelle

et tactile) chez des sujets âgés de 11 à 14 ans en utilisant un paradigme de détection. Les auteurs ont globalement mis en évidence la présence d'indices d'IMS chez les sujets TSA qui se manifestaient au niveau de zones cérébrales similaires aux sujets contrôles mais à des latences plus tardives. Plus précisément, concernant l'intégration audiovisuelle, des effets non linéaires se sont manifestés au niveau frontocentral entre 80 et 200 ms post stimulus chez les sujets contrôles et plus tardivement, entre 150 et 200 ms chez les sujets TSA. Concernant l'intégration multisensorielle de trois modalités, des effets non linéaires ont été retrouvés au niveau frontocentral et centroparietal à partir de ~ 60 jusqu'à 200 ms chez les sujets contrôles et à partir de ~ 130 ms jusqu'à 200 ms chez les sujets TSA.

Nous comprenons que ces études ont généralement mis en évidence une manifestation neurophysiologique de l'intégration multisensorielle recrutant davantage les aires sensorielles temporales et pariéto-occipitales dans le TSA, se manifestant généralement à des latences plus tardives que les sujets contrôles. Malgré des différences retrouvées systématiquement au niveau fonctionnel, les auteurs ont soit retrouvé une facilitation multisensorielle comportementale intacte chez les sujets TSA ou soit dégradée (voir section 1.2.4), ce qui pose la question de l'efficacité des réseaux cérébraux impliqués dans l'IMS au sein du spectre de l'autisme. Notons qu'aucune étude neurophysiologique n'a été menée chez des sujets adultes, dans le spectre de la personnalité autistique et en utilisant des informations dynamiques. Ce travail de thèse s'est employé à répondre à ce manque de données dans la littérature en proposant une étude portant sur les corrélats neuronaux de l'intégration multisensorielle de stimuli en mouvement selon les traits de personnalité autistique.

1.3.4 Résumé

- ❖ Le modèle actuel de l'IMS propose que nous la retrouvons à tous les niveaux de traitement de l'information, tant au niveau des aires cérébrales dites de haut niveau (e.g., aires sensorielles associatives), que de bas niveau (e.g., aires sensorielles primaires).
- ❖ **L'EEG** est une technique de **neuro-imagerie indolore, non-invasive, facile d'utilisation** et caractérisée par une **résolution temporelle** de l'ordre de la milliseconde, faisant de celle-ci un outil privilégié pour l'étude de l'IMS.
- ❖ Un modèle a été spécifiquement développé afin d'étudier les **corrélats neuronaux de l'IMS à partir des signaux EEG** : il s'agit du **modèle additif** qui compare les conditions audiovisuelles à la somme des conditions unisensorielles.
- ❖ L'étude de Cappe et al. (2012) a mis en évidence les corrélats neuronaux de **l'intégration multisensorielle du mouvement en approche** qui se manifestent à des **latences très précoces** post-stimulus, suggérant une **intégration spécifique** de tels signaux.
- ❖ Dans le **TSA**, les études mettent globalement en évidence **une IMS** se déroulant **strictement au niveau des aires sensorielles**, comparativement aux sujets contrôles qui présentent un réseau d'intégration plus étendu. Néanmoins, il y a un **manque évident de données neurophysiologiques** dans le spectre de l'autisme, surtout selon les traits de personnalité autistique. **Aucune étude n'a été menée chez des sujets adultes** et n'a utilisé de **stimuli dynamiques**.

1.4 Synthèse et objectifs

Bien que les difficultés sociales aient été considérées au cœur du Trouble du Spectre de l'Autisme (TSA), la recherche accorde aujourd'hui un rôle prépondérant au fonctionnement sensoriel dans le continuum autistique (Mayer, 2017; Robertson & Baron-Cohen, 2017; Thye et al., 2018). Notre environnement étant principalement constitué d'informations multisensorielles dynamiques et le mouvement en profondeur (en approche/en éloignement) étant particulièrement important dans nos activités sociales et non-sociales, étudier ces informations semble crucial et ce tout le long du continuum autistique.

En conséquence, l'objectif principal de cette recherche était de caractériser l'intégration multisensorielle du mouvement en profondeur au sein du continuum autistique (dans la personnalité autistique et dans le TSA), sur la base d'indices comportementaux et neurophysiologiques. Pour répondre à cet objectif, le profil autistique et sensoriel des participants a été établi à partir d'outils largement utilisés dans la littérature (Quotient Autistique et Profil sensoriel de Dunn). De plus, sur la base de précédents travaux (Cappe et al., 2012; Cappe, Thut, et al., 2009), nous avons utilisé un paradigme expérimental de détection d'informations dynamiques (non sociales) dans les modalités auditives, visuelles et audiovisuelles. Un tel paradigme nous a permis d'appliquer des modèles spécifiques de l'intégration multisensorielle tant au niveau comportemental (temps de réaction), qu'au niveau neurophysiologique (EEG, ERPs). Nous nous attendions à ce que les indices d'IMS soient diminués chez les sujets ayant une personnalité autistique élevée et chez les sujets TSA et que cette diminution suive une expression linéaire qui s'intensifie de la personnalité autistique faible vers le TSA. Un sous-objectif de cette recherche était de déterminer l'effet de la vitesse de présentation des stimuli sur l'IMS des participants. Puisque de nombreuses études ont mis en évidence un effet bénéfique du ralentissement sur la perception des sujets TSA (e.g., Gepner et al., 2022), nous nous attendions à ce que la présentation de stimuli en vitesse lente réduise les différences d'IMS au sein du continuum autistique.

Etudes comportementales

L'étude 1 a été menée chez des sujets non-TSA selon leur quotient autistique (article accepté) et l'étude 2 a permis d'inclure des données préliminaires dans le TSA afin d'avoir une lecture complète du continuum autistique (personnalité autistique et TSA). Dans l'objectif de caractériser l'IMS de mouvements en profondeur, la présence de facilitation multisensorielle a été testée à partir des temps de réaction et des réponses correctes. En outre, un modèle

comportemental de l'IMS a été appliqué afin de mieux appréhender les processus d'IMS selon le groupe autistique (personnalité autistique faible/élevée), le mouvement (en approche/en éloignement) et la vitesse (rapide/lente).

Etude neurophysiologique

Afin d'étudier les corrélats neuronaux de l'IMS du mouvement en profondeur au sein du continuum autistique, l'électro-encéphalographie a été utilisée dans l'étude 3 (en cours de rédaction). Cette technique d'une grande précision temporelle constitue un outil privilégié dans l'étude de l'IMS pour laquelle un modèle d'analyse a été proposé au sein du domaine temporel. Nous avons plus particulièrement appliqué ce modèle aux réponses cérébrales qui succédaient les 250 ms après la présentation des stimuli, ce qui nous a permis d'étudier les étapes précoces des processus intégratifs. Ajoutons que l'étude porte uniquement sur la personnalité autistique de sujets non-TSA, le recueil de données étant encore en cours pour les sujets TSA.

En outre, un intérêt plus large au lien entre le fonctionnement sensoriel et social a motivé le développement d'une étude en ligne pour laquelle le recueil de données est toujours en cours. Si le fonctionnement sensoriel est lié au développement du fonctionnement social et qu'une atteinte de celui-ci est au cœur des difficultés des sujets TSA, alors nous devrions retrouver des difficultés sociales et plus largement, des particularités autistiques chez des sujets présentant des spécificités du fonctionnement sensoriel. Pour commencer à tester simplement cette hypothèse, une étude en ligne à partir de questionnaires évaluant le quotient autistique (AQ), le profil sensoriel (AASP) et les capacités sociales (RECS) a été adressée à des sujets de 11 à 55 ans avec un TSA, un trouble sensoriel (hyperacousie, photophobie, malentendance, malvoyance) ou sans TSA ni trouble sensoriel (sujets contrôles). Le recueil de données est encore en cours.

L'analyse des données préliminaires de cette étude chez des sujets contrôles (n= 75), a soulevé une problématique importante concernant le lien entre le quotient autistique (AQ) et les capacités sociales vie réelle vs. en ligne (RECS) et a motivé la rédaction d'un article (soumis, voir section 4.2). Bien qu'Internet soit largement utilisé pour communiquer (à partir des réseaux sociaux, par exemple), aucune étude n'avait exploré les compétences sociales en ligne dans la personnalité autistique. Notre étude supplémentaire a tenté de caractériser les compétences sociales dans la vie réelle et en ligne de sujets non-TSA selon leur personnalité autistique.

2 PARTIE 2 – CONTRIBUTIONS EXPERIMENTALES

2.1 Etudes comportementales

2.1.1 Etude 1

*What makes the detection of movement different within the autistic traits spectrum?
Evidence from the audiovisual depth paradigm*

Cette étude a été acceptée dans la revue *Multisensory Research - Brill*

What Makes the Detection of Movement Different within the Autistic Traits Spectrum? Evidence from the Audiovisual Depth Paradigm

Rachel Poulain^{1,2}, Magali Batty¹ and Céline Cappe^{2,*}

¹Centre d'Etudes et de Recherches en Psychopathologie et Psychologie de la Santé – EA7411
– Université Toulouse 2, Toulouse, France

²Centre de Recherche Cerveau et Cognition – UMR 5549 CNRS – Université Toulouse 3 Paul
Sabatier, Toulouse, France

Received 21 December, 2022; accepted #####, 2023

* To whom correspondence should be addressed. E-mail: Celine.cappe@cnrs.fr

Abstract

Atypical sensory processing is now considered a diagnostic feature of autism. Although multisensory integration (MSI) may have cascading effects on the development of higher-level skills such as socio-communicative functioning, there is a clear lack of understanding of how autistic individuals integrate multiple sensory inputs. Multisensory dynamic information is a more ecological construct than static stimuli, reflecting naturalistic sensory experiences given that our environment involves moving stimulation of more than one sensory modality at a time. In particular, depth movement informs about crucial social (approaching to interact) and non-social (avoiding threats/collisions) information. As autistic characteristics are distributed on a spectrum over clinical and general populations, our work aimed to explore the multisensory integration of depth cues in the autistic personality spectrum, using a go/no-go detection task. The autistic profile of 38 participants from the general population was assessed using questionnaires extensively used in the literature. Participants performed a detection task of auditory and/or visual depth moving stimuli compared to static stimuli. We found that subjects with high-autistic traits overreacted to depth movement and exhibited faster reaction times to audiovisual cues, particularly when the audiovisual stimuli were looming and/or were presented at a fast speed. These results provide evidence of sensory particularities in people with high-autistic traits and suggest that low-level stages of multisensory integration could operate differently all along the autistic personality spectrum.

Keywords

Multisensoriality, depth movement, personality traits, autism spectrum disorder, psychophysics

1. Introduction

Autism Spectrum Disorder (ASD) is a neurodevelopmental disorder characterized by (i) deficits in social communication/interaction and by (ii) repetitive and restricted behaviors. Within this second group of symptoms, atypical sensory processing is now considered a diagnostic feature of ASD (APA, 2013). This is typically the case when individuals avoid certain sensory stimuli (e.g., averting certain noises or textures) and seek out sensory experiences through stimulatory behaviors (e.g., stimulating their eyes with their hands). Reports estimate that atypical reactivity to sensory inputs is prevalent in 69–95% of the ASD population (Hazen *et al.*, 2014), confirming that sensory abnormalities concern the vast majority of individuals with ASD. Given the significance of sensory symptoms, growing evidence suggests that these may have detrimental effects on higher-order processes such as social interaction and communication (Ayres and Tickle, 1980; Robertson and Baron-Cohen, 2017). Thus, disturbance in the processing of basic visual or auditory information may contribute to the emergence and/or to the intensity of deficits found at the higher level, such as socio-communicative functioning (Marco *et al.*, 2011b). Along this line, previous studies highlighted a relationship between sensory-processing particularities and communication difficulties (Lane *et al.*, 2010), social responsiveness (Baker *et al.*, 2008; Hilton *et al.*, 2007), and maladaptive behaviors (Chen *et al.*, 2009).

Although unisensory processing has been extensively studied in ASD and is increasingly characterized (for a review, see Ben-Sasson *et al.*, 2009), there is a lack of understanding regarding the processing of multisensory stimuli within the ASD (for a review, see Feldman *et al.*, 2018). Multisensory integration (MSI) provides the merging of sensory inputs originating from multiple sensory modalities to build a unified and coherent internal representation of our external environment. MSI provides a crucial behavioral benefit by enabling incoming information to be processed more quickly and effectively. This performance enhancement has been referred to as ‘multisensory facilitation’ (Stein, 2012; Stein and Meredith, 1993). Given the predominant socio-communicative difficulties in ASD, most research investigations have used complex social stimuli to explore multisensory integration in the disorder. By assessing the responses of ASD participants to auditory (voice), visual (face), or audiovisual speech (voice and face) stimuli, alterations in MSI have been revealed. Studies reported difficulties in unifying voices and faces to the same emotion (e.g., Loveland *et al.*, 1995; O’Connor, 2007), and reduced multisensory facilitation in recognition tasks of emotions within the ASD (Xavier *et al.*, 2015). In addition, ASD participants demonstrated atypical sensitivity to the McGurk illusion (Fuxe *et al.*, 2015; Woynaroski *et al.*, 2013), and a reduced

benefit from lipreading in auditory speech discrimination tasks (Newman *et al.*, 2021; Smith and Bennetto, 2007). However, to ascertain whether impairment of MSI within ASD is related to a basic perceptual difference and not to differences in social abilities, stimuli void of social content must be used. Three approaches to study the MSI of nonsocial information in ASD have been used and have produced mixed results. First, in the temporal processing approach, the temporal range within which stimuli from different sensory modalities are perceived as simultaneous has been investigated as a ‘Temporal Binding Window’ (TBW). This TBW was found to be either significantly larger in ASD participants (Kwakye *et al.*, 2011; Noel *et al.*, 2018; Woynaroski *et al.*, 2013) or similar to that of control participants (Stevenson *et al.*, 2018). Second, the ‘fusion illusion’ refers to the perception of multiple flashes when the display of a single flash is associated to multiple auditory tones. This illusion was reported to be either weakened in ASD (Foss-Feig *et al.*, 2010; Stevenson *et al.*, 2014) or similar to that of control participants (Keane *et al.*, 2010; Stevenson *et al.*, 2018). Third, controversial results can also be found regarding multisensory facilitation, which has been demonstrated to be either intact (e.g., de Boer-Schellekens *et al.*, 2013; Stefanou *et al.*, 2020) or degraded in ASD (e.g., Ainsworth *et al.*, 2021; Brandwein *et al.*, 2013).

Most of the previous studies focused on static sensory inputs. The stimuli to which our everyday activities expose us, however, are mainly dynamic. Multisensory moving information may therefore be a more ecological construct, reflecting naturalistic sensory experiences given that our environment involves moving stimulation of more than one sensory modality at a time. Depth movement in particular is a crucial signal, as it informs about a distancing (receding) object which one must decide to pursue or to stay away from for safety. More importantly, it informs about potential threats such as approaching (looming) objects which one must decide either to avoid or confront. Thus, unsurprisingly, preferential responsiveness to looming signals has been previously demonstrated in the general population (e.g., Maier *et al.*, 2008; Neuhoff, 1998, 2001). In addition, multisensory facilitation increased specifically for looming signals (Cappe, Thut, et al., 2009). Depth movement is commonly involved in social interactions in which a person approaches another one to interact or avoids social contact by distancing themselves from others, rendering this movement interesting within ASD where social functioning is one of the main areas of difficulty. The biological motion represents human actions using displays of moving light points (Blake and Shiffrar, 2007; Johansson, 1973). It transmits the information of a body in walking motion facing the participants, which in real life is expressed by a looming or receding movement. At an early age, a preference for human biological movement is not observed in ASD compared to control subjects (Annaz *et al.*, 2012;

Falck-Ytter *et al.*, 2013). In addition, the recent meta-analysis by Todorova *et al.* (2019) based on 52 studies confirmed the presence of difficulties in recognizing biological movement in ASD (this includes global body movement, facial or eye movement displayed with light points). Centelles *et al.* (2013) studied the recognition abilities of a ‘social movement’ which involves interaction with other individuals (e.g., playing football), to a ‘non-social movement’ which constituted any human movement without social interaction. (e.g., walking, stepping forward or backward). Results showed that ASD subjects are less successful at categorizing both types of movement and exhibited a slower response speed for social movement. It therefore seems that there are difficulties for ASD subjects perceiving movement that transmits social information, either directly (movement involving social interaction) or indirectly (movement involving at least one person).

However, to our knowledge, only one study focused on depth movement in ASD and used exclusively looming complex visual stimuli (Hu *et al.*, 2017). The authors found a lack of behavioral reactivity to aversive looming signals in ASD participants associated with abnormality (weak connectivity) in a neuronal pathway involved in looming-evoked defensive responses (superior colliculus–pulvinar–amygdala). Other studies focused on visual radial movements (expansion/contraction) and demonstrated identification difficulties in ASD (Bertone *et al.*, 2003). Using an immersive installation to focus on visuopostural tuning in ASD, postural hyporeactivity to expansion movement was also found (Gepner and Mestre, 2002; Greffou *et al.*, 2012). According to the temporospatial processing hypothesis (Gepner and Féron, 2009), such difficulties in movement processing observed in ASD are the consequence of impairment in integrating information across time and space, leading to the perception of the environment changing too rapidly. In support of this hypothesis, previous studies demonstrated that ASD participants recognize and spontaneously imitate emotional and non-emotional facial expressions better when the presentation speed is slowed down (Lainé *et al.*, 2008, 2011; Meiss *et al.*, 2015; Tardif *et al.*, 2007). In addition, autobiographical reports from individuals with ASD describe a world that is ‘moving too fast’ (Grandin, 1995; D. Williams, 1999).

The dimensional model of ASD proposes that autistic characteristics are distributed on a continuum over clinical and general populations (Baron-Cohen, 1995; Hobson, 1992). Thus, as a spectrum disorder, specific traits associated with ASD are not only found in individuals with a clinical diagnosis but are also found in the general population. In order to assess the degree of autistic traits in any individual adult, psychometric tools were developed such as the ‘Autism Spectrum Quotient’ (AQ; Baron-Cohen *et al.*, 2001). In addition, the sensory profile of an individual can be assessed using the Adolescent/Adult Sensory Profile (AASP; Brown

and Dunn, 2002). Several similarities were demonstrated between ASD and the high-autistic personality, such as cognitive processing (e.g., Almeida *et al.*, 2010; Bayliss and Tipper, 2005; Grinter *et al.*, 2009a, b), sensory processing in several modalities (e.g., Clark *et al.*, 2013; Mayer, 2017; Takayama *et al.*, 2014), multisensory integration (e.g., Donohue *et al.*, 2012; van Laarhoven *et al.*, 2019; Yaguchi and Hidaka, 2018) and impaired responses to social information (e.g., Stewart and Ota, 2008; Voos *et al.*, 2013). Moreover, recent studies reported similar neurobiological, neuroanatomical, and neurofunctional issues between subjects with ASD and those without ASD but with high-autistic traits (Alemany *et al.*, 2021; Kondo and Lin, 2020; von dem Hagen *et al.*, 2013).

Given the predominance of moving multisensory information in our environment and the continuum distribution of autistic particularities in the general population, it remains crucial to characterize the MSI of dynamic information within the autistic spectrum. According to growing evidence in the literature, sensory atypicalities could have a cascade influence and contribute to overall difficulties within the autistic spectrum, encouraging the use of simple non-social stimuli in present and future studies. In this framework, the present study aimed to explore the multisensory integration of depth cues in the autistic traits spectrum, using a go/no-go detection task.

2. Material and Method

2.1. Participants

Forty-three young adults (10 males) between the ages of 18 and 25 years (mean = 22.21 years, SD = 1.9) participated in this study. All participants had normal hearing and normal or corrected-to-normal vision and had no history of neurological or psychiatric illness. Of these 43 participants, five were excluded for having insufficient correct responses in the behavioral experiment (see section 2.5. *Data Analysis*), leaving 38 participants (10 males) with a mean age of 22.23 (SD = 1.95). According to a standardized handedness questionnaire (Oldfield, 1971), the majority ($n = 34$) were right-handed. The study conformed with the Code of Ethics of the World Medical Associations (Declaration of Helsinki) and was approved by the local research ethics committee (Comité de Protection des Personnes Sud Méditerranée III, Avis N° 2020-A03056-33). All participants provided written informed consent and received monetary compensation. Participants took part in the study in a single two-hour session. First, the autistic traits and sensory profiles of the participants were measured using two questionnaires in a paper–pencil format. Second, they performed a computerized behavioral experiment.

2.2. Autistic Traits and Sensory Profiles

The Autism Spectrum Quotient (AQ) is a validated 50-item self-report questionnaire for identifying the degree to which an adult presents autistic traits. The instrument measures five dimensions (10 items each): Social skill (e.g., “I find it hard to make new friends”), Attention switching (e.g., “I frequently get so strongly absorbed in one thing that I lose sight of other things”), Attention to detail (e.g., “I often notice small sounds when others do not”), Communication (e.g., “I enjoy social chit-chat”) and Imagination (e.g., “I find making up stories easy”) (Baron-Cohen *et al.*, 2001). Each response is scored 0 or 1, a higher score indicates higher levels of autistic behavior. Previous studies found a high internal consistency for the overall AQ score with a Cronbach’s alpha between 0.72 and 0.79 (Hoekstra *et al.*, 2008; Ruzich *et al.*, 2015; Stevenson and Hart, 2017). We used the French version of the AQ (Kempnaers *et al.*, 2017).

In order to obtain an assessment of the sensory processing of the participants, AASP (Brown and Dunn, 2002) was administered. This self-reported questionnaire includes 60 items, each describing a behavior related to an everyday sensory experience that is assessed with a five-point Likert scale. Items are scored by sensory factor: taste/smell, movement, visual, tactile, activity level and auditory processing (e.g., “I stay away from noisy settings”); and behavior profile: low registration, sensory sensitivity, sensation-avoiding and sensation-seeking (e.g., “I work on two or more tasks at the same time”). The total score ranges from 60 to 300 with higher scores indicating a higher sensory sensitivity. Brown and Dunn (2002) found that the questionnaire presented a moderate Cronbach’s alpha ($\alpha = 0.64$). We used the French version of the AASP (Brown and Dunn, 2006).

2.3. Behavioral Experiment

The stimuli and procedure were adapted from the previous study by Cappe *et al.* (2009). The stimuli were visual, auditory, or audiovisual and could be dynamic or static. In dynamic conditions, stimuli varied in movement (looming or receding) and in presentation speed (fast or slow). To induce the perception of movement, auditory stimuli changed in volume and visual stimuli changed in size to give the impression of either looming or receding. The slow presentation was based on the original stimuli from Cappe *et al.* (2009). The speed presentation of the stimuli was multiplied by 2 for the fast condition. Static information was added at the end of each fast stimulus so that all stimuli had the same duration of 500 ms. All stimuli were initially of the same size/intensity to ensure that participants used dynamic information to perform the task (see Fig. 17). The audiovisual condition consisted of the auditory and visual

stimuli presented simultaneously and was always congruent in speed and in movement. In static conditions, the size and volume of static stimuli were constant.

The visual stimuli were presented in the center of the screen at a viewing distance of ~80 cm from the eyes of the participants and were generated with MATLAB Version: 9.13.0 (R2022b) and the Psychophysics Toolbox (Brainard, 1997). The stimuli consisted of a disk that was either white on a black background or black on a white background, randomized across blocks of trials, and were presented with a 50% contrast. They were symmetrically expanded from 7° to 13° diameter (looming condition) or contracted from 7° to 1° diameter (receding condition). In the slow condition, the expansion and contraction lasted for 500 ms. In the fast condition, the movement lasted for 250 ms (i.e., acceleration $\times 2$ of the slow condition). Then static visual information was added at the end of each visual fast stimulus for the other 250 ms. In static conditions, the size of visual stimuli was constant (see Fig. 17A).

The auditory stimuli differed by 2 dB of those used in the original study of Cappe *et al.* (2009). They were presented binaurally over insert earphones (Etymotic model ER3XR), were 1000-Hz tones composed of a triangular waveform and generated with Adobe Audition software (Adobe Systems Inc., San Jose, CA, USA). To prevent the occurrence of clicks, 10 ms onset and offset ramps composed the auditory stimuli which were sampled at 44.1 kHz. The intensity of the tones either increased (looming condition) or decreased (receding condition) by 10 dB approximately linearly during 500 ms in the slow condition. In the fast condition, an acceleration $\times 2$ was not effective in perceiving faster movement. In order to enhance perception of fast stimuli, the movement duration was set to 220 ms for auditory conditions. Static auditory information was added at the end of each fast auditory stimulus. In static conditions, the volume of auditory stimuli was constant (see Fig. 17B).

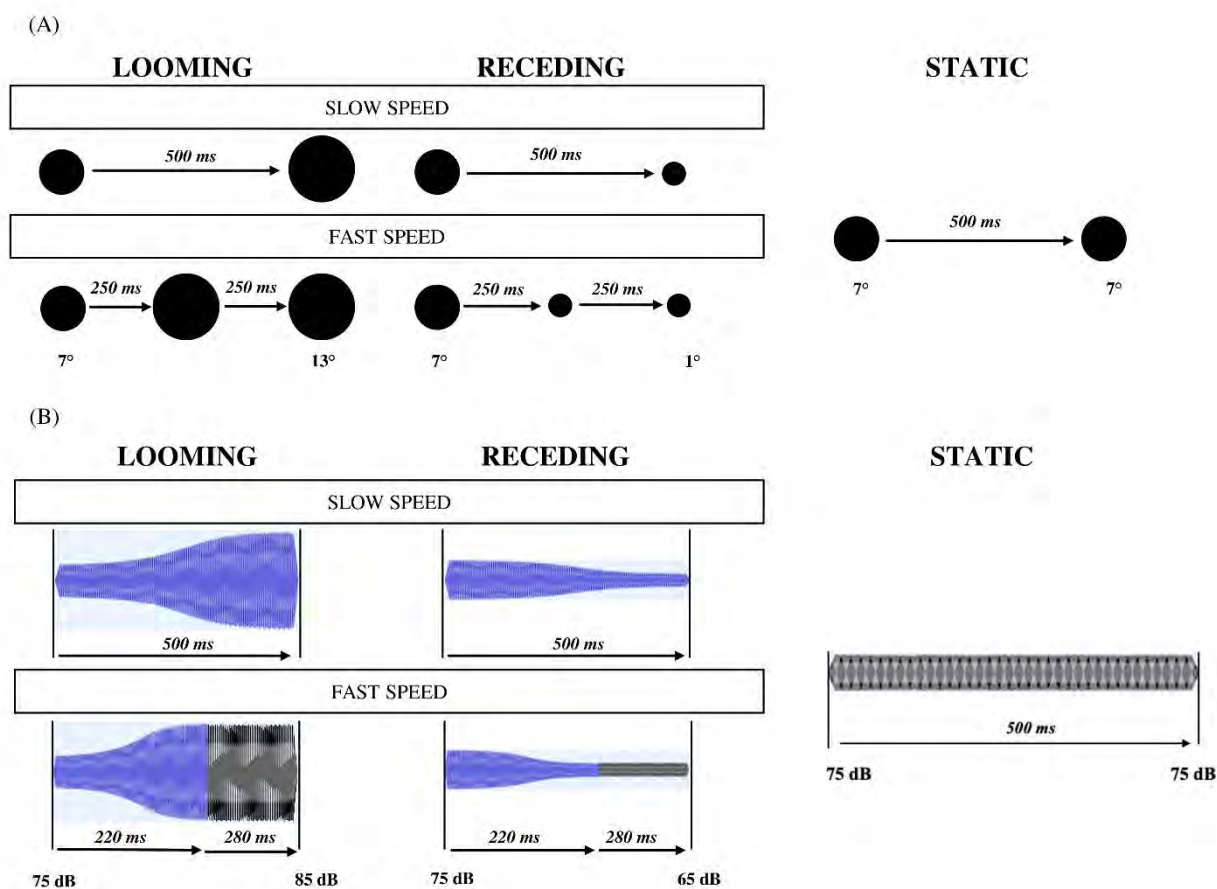


Figure 17. Experimental stimuli. (A) The movement of visual stimuli symmetrically expanded (looming) or contracted (receding) over the duration of 500 ms in the slow speed and 250 ms in the fast speed conditions. (B) In the auditory modality, the perception of movement was induced by rising-intensity (looming) or falling-intensity (receding) complex tones during 500 ms in the slow speed and 220 ms in the fast speed. Static information was added at the end of fast visual and auditory stimuli so that all experimental conditions had a duration of 500 ms.

2.4. Procedure

Participants sat in a silent and dimly lit room to complete a go/no-go detection task validated in a sample of young adults (Cappe, Thut, et al., 2009). When a moving stimulus appeared (go condition), participants were instructed to press a response button with their dominant hand, and conversely, when a static stimulus (no-go condition) was presented, participants were told not to press it. Participants had to respond to the stimulus as fast and as accurately as they could. Reaction times in go conditions and accuracy in go as well as in no-go conditions were recorded and analyzed.

There were 15 experimental stimulations varying in modality, movement and speed. Each stimulus was presented 50 times and was randomly intermixed within 10 blocks of 75 trials each. After a cross fixation time (cross fixation 1) varying between 800 and 1400 ms (randomly assigned in each trial), a stimulus was presented for 500 ms during which participants' responses were recorded. Another period of cross fixation of 1000 ms (cross fixation 2) was added to record participants' responses after the stimulus presentation (see Fig. 18). Thus, participants could respond both during the stimulus presentation and the fixation cross 2, leading to the recording of responses from the presentation of stimuli to 1500 ms post-stimulus.

All stimuli were presented using EvenTIDE software Version 2017.1.2 (Okazolab). Go conditions (i.e., dynamic stimuli) occurred 80% of the time.

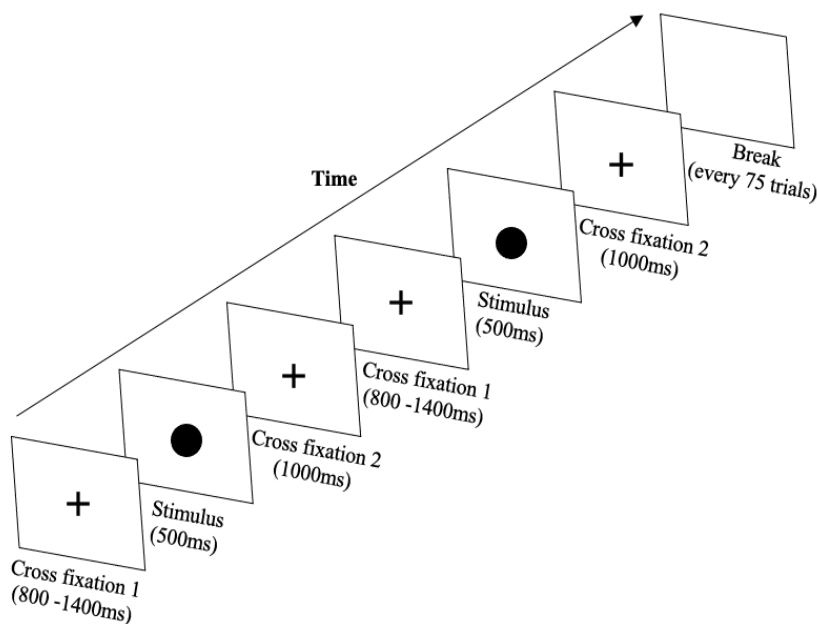


Figure 18. Experimental paradigm. Example of two successive trials.

2.5. Data Analysis

2.5.1. Autistic Traits and Sensory Profiles

We examined the relationship between the AASP and the AQ scores using Pearson correlations. As the scores of the two questionnaires correlated positively (see section 3.1. Autistic Traits and Sensory Profiles), we used the AQ only to explore the relationship between autistic traits and responses to the behavioral experiment. To do so, we split our population into two groups according to the median score of the AQ, resulting in a high-AQ group (AQ+, $n = 19$, male = 7) and a low-AQ group (AQ-, $n = 19$, male = 3). As no gender effect was found on reaction times (males: mean = 526.99 ms, SD = 159.56 ms; females: mean = 535.27 ms, SD = 171.31 ms; $Z = -1.52$, $p = 0.129$), on percentage of correct responses in go conditions (males: mean = 0.86%, SD = 0.17%; females: mean = 0.87%, SD = 0.15%; $Z = -1.19$, $p = 0.235$), as well as on percentage of correct responses in no-go conditions (males: mean = 0.87%, SD = 0.12%; females: mean = 0.85%, SD = 0.14%; $Z = 0.612$, $p = 0.541$), this variable was not included in the analysis.

2.5.2. Outlier Rejection Process

In the analysis of reaction times (RTs), RTs occurring earlier than 150 ms post stimulus onset were considered as anticipated. RTs occurring later than 1000 ms post stimulus onset were interpreted as misses. Thus, only responses with RTs between 150 ms and 1000 ms were included. The accuracy analysis (incorrect and correct responses, see below) was based on the overall responses, including responses with RTs earlier than 150 ms and later than 1000 ms post stimulus. For both the analysis of RT and accuracy, participants with less than 10 responses per go condition were excluded. This criterion led to the exclusion of the data of five participants, giving a final analyzed sample of 38 participants. In total, the mean and the standard deviation of trial numbers per condition included in the RT analysis were 40.94 (± 6.05) for the AQ- group and 43.67 (± 4.7) for the AQ+ group. The accuracy analysis was based on 43.04 trials (± 8.05) per condition for the AQ- group and 45.06 trials (± 6.29) per condition for the AQ+ group.

2.5.3. Generalized Linear Mixed-Effects Models

Accuracy and RTs for go conditions were analyzed using generalized linear mixed-effects models (GLMMs) where the modality (A: auditory vs V: visual vs AV: audiovisual), the movement (L: looming vs R: receding), the speed (F: fast vs S: slow) and the AQ group (AQ+ vs AQ-) were considered as fixed effects while the subject parameter was considered as a

random effect. Accuracy for no-go conditions was analyzed using another GLMM where the modality (A: auditory vs V: visual vs AV: audiovisual) and the autistic personality group (AQ+ vs AQ-) were considered as fixed effects while the subject parameter was considered as a random effect.

While the GLMM of RTs was computed using a gamma distribution family and an identity link function, as implemented in the *lme4* library in R software, the GLMMs of correct responses (for go and no-go conditions) were computed with a binomial family and a logit link function, as also established in the *lme4* library in R software (Bates *et al.*, 2015). The binary response variable was the accuracy of the response whereby 1 = correct response and 0 = incorrect response. Mixed models provide more accurate estimates than those based on second-level statistics (the scores of each subject) because they take into account the number of trials used to compute each score.

Nakagawa's R^2 was used to assess the model's goodness of fit (see Table 4). To test the GLMM statistically, Wald chi-squared tests were used and post-hoc tests were subsequently conducted using Wilcoxon rank tests with a False Discovery Rate correction (FDR; Benjamini and Hochberg, 1995). Results were considered significant at $p < 0.05$. Because the quality of the model of no-go conditions was weak ($R^2 = 0.05$, see Table 4), results focused on models of go conditions.

Table 4. Generalized linear mixed-effects models for go conditions and no go conditions

Conditions	Models	R2
Go conditions	Reaction times ~ Modality x Movement x Speed x AQ Group	0.89
	Accuracy ~ Modality x Movement x Speed x AQ Group	0.17
No go conditions	Accuracy ~ Modality x AQ Group	0.05

2.5.4. Race Model Analysis

Our psychophysical index of MSI was based on Miller's Race Model (Miller, 1982), a stringent and established behavioral metric of MSI based on RTs. According to this model, a behavior benefit can occur because the multisensory stimulus is composed of two signals to trigger a response (e.g., auditory and visual), and the fastest signal wins. This race between the two unisensory signals can lead to faster RTs to multisensory stimuli because of probability summation. The model is tested as follows: for any latency t , predicted cumulative probability (CP) values of multisensory stimuli (TR_{AV}) are calculated by summing the CP of each unisensory stimulus (TR_A and TR_V) from which the expression of their joint probabilities is subtracted:

$$\text{Predicted } CP \cdot (TR_{AV} \leq t) = CP \cdot (TR_A \leq t) + CP \cdot (TR_V \leq t) - CP \cdot (TR_A \leq t) * CP \cdot (TR_V \leq t)$$

A 'Miller Inequality' value is calculated by subtracting the value predicted by the race model from the CP of the participants' RTs to the AV stimulus. Positive values represent the violation of the race model and suggest that sensory inputs interacted during processing to facilitate RTs. To compare the Miller inequality values between AQ groups, non-parametric permutation tests (10,000 permutations) based on the t -statistic were computed. The same statistical tests were used to test the significance of the model violation in each AQ group.

3. Results

3.1. Autistic Traits and Sensory Profiles

The global score of the AQ ranged from 3 to 36 with a mean of 16.94 (SD = 7.41) and a median of 14. The mean score of the AASP was 157.62 (SD = 21.93) with a range from 92 to 207 and a median of 155. In agreement with the literature (Horder *et al.*, 2014; Mayer, 2017), the global scores of these two questionnaires were positively correlated ($r = 0.57, p < 0.001$; see Fig. 19), meaning that the more the participants present autistic characteristics, the more they have sensory particularities. These results support the dimensional model of ASD which proposes that both spheres of autistic characteristics (impairment in social interaction and atypical behaviors including sensory peculiarities) extend in the general population. Because the AQ has been extensively used in the literature to study autistic personality traits and assesses more specific personality dimensions of ASD than the AASP does, which only focuses on sensory functioning, we decided to use only the AQ to explore the relationship between autistic traits and responses to the behavioral experiment. Additional analysis with the AASP is explored in the Supplementary Materials.

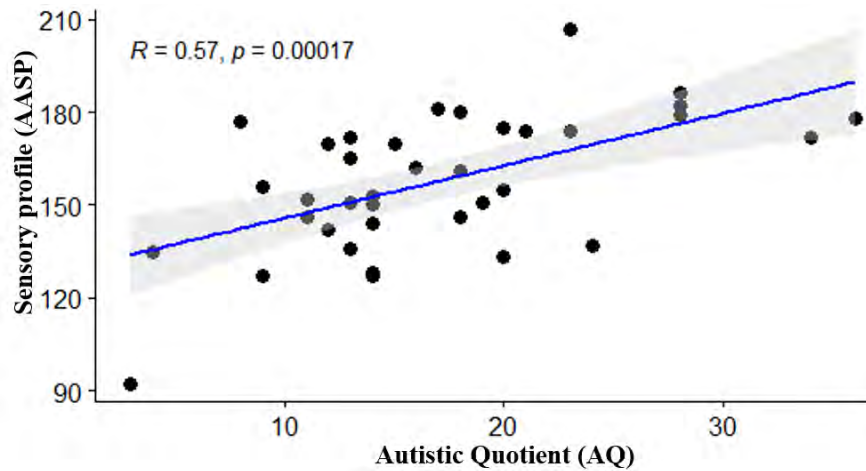


Figure 19. Correlation representation between the Autism Spectrum Quotient (AQ) and the sensory profile (AASP). The regression line and the confidence intervals are represented by the solid line and shaded, respectively.

3.2. Generalized Linear Mixed-Effects Models

3.2.1. Accuracy

The mean performance reached 88% in the go conditions (SEM = 0.008%) and 85% in the no-go conditions (SEM = 0.02%).

A significant *main* effect of the group was found, owing to the higher accuracy in the AQ+ compared to the AQ- group ($Z = 10.41, p < 0.0001$; see Fig. 20A). A significant main effect of the modality, $\chi^2(2) = 1141.88, p < 0.001$, showed a lower accuracy in the auditory modality than in either the audiovisual ($Z = -29.24, p < 0.0001$) or the visual ($Z = -28.47, p < 0.0001$) modality.

A significant Modality \times Group interaction, $\chi^2(2) = 6.58, p < 0.05$, revealed that only the AQ+ group had a higher accuracy in the audiovisual modality compared to the visual modality ($Z = 2.54, p = 0.01$; see Fig. 20B).

A significant main effect of the movement revealed a higher accuracy in the looming conditions compared to the receding conditions ($Z = 19, p < 0.0001$). This result is possibly attributable to a significant Modality \times Movement interaction, $\chi^2(2) = 198.85, p < 0.001$, showing a higher accuracy in the looming condition than in the receding condition only within the auditory modality ($Z = 22.34, p < 0.0001$). The Modality \times Speed \times Group interaction was significant, $\chi^2(2) = 10.21, p < 0.01$ and revealed that the AQ- group had a lower accuracy in the auditory slow condition than the AQ+ group, whatever the condition ($A^F: Z = -10.12, p < 0.0001$; $A^S: Z = -9.75, p < 0.0001$; $V^F: Z = -3.75, p < 0.0001$; $V^S: Z = -2.45, p < 0.0001$; $AV^F:$

$Z = -5.08, p < 0.0001$; $AV^S: Z = -4.61, p < 0.0001$). No other significant interactions were found ($p > 0.11$).

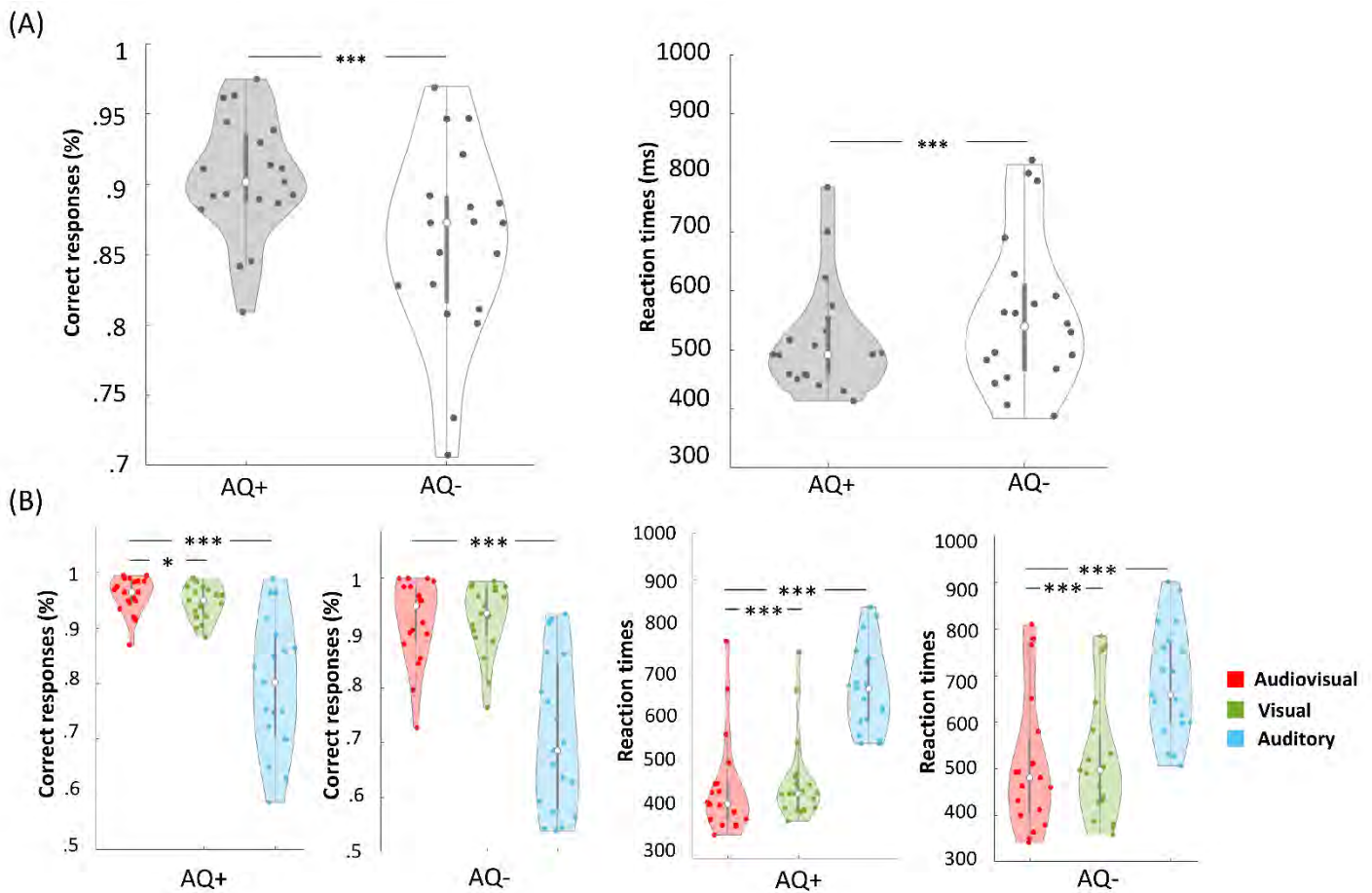


Figure 20. Accuracy and reaction times (RTs) across Autism Spectrum Quotient (AQ) groups and sensory modalities. To represent the results of the binomial generalized linear mixed-effects models (GLMMs) (1 = correct response; 0 = incorrect response), binary values of the model were transformed into a rate of correct responses. (A) Individual transformed binary values (left) and Individual RTs (right) for the high and low AQ group. (B) Individual transformed binary values (left) and Individual RTs (right) for the AQ groups across the sensory modalities (audiovisual, visual and auditory respectively). In each plot, the median, the interquartile range, and the density are represented. ***, $p < 0.0001$; *, $p < 0.05$.

3.2.2. Reaction Times (RTs)

A significant main effect of the group revealed that the AQ+ group detected depth movement faster than the AQ- group ($Z = -14.76, p < 0.0001$; see Fig. 20A).

A significant main effect of the modality was found, $\chi^2(2) = 18578.62, p < 0.001$, RTs was shorter in the audiovisual modality than in either the visual ($Z = -8.27, p < 0.0001$) or the auditory ($Z = 60.83, p < 0.0001$) modality (see Fig. 20B). A significant Modality \times Group interaction, $\chi^2(2) = 401.13, p < 0.0001$, revealed that the AQ+ group were particularly faster in the audiovisual modality compared to the AQ- group whatever the modality (A: $Z = -48.8, p < 0.0001$; V: $Z = -18.47, p < 0.0001$; AV: $Z = -13.15, p < 0.0001$).

A significant main effect of movement revealed shorter RTs in looming conditions compared to receding conditions ($Z = -2.81, p < 0.01$). As revealed by a significant Movement \times Group interaction, $\chi^2(1) = 21.66, p < 0.0001$, the AQ+ group was faster in the looming conditions compared to the AQ- group whatever the movement condition (looming: $Z = -8.42, p < 0.0001$; receding : $Z = -12.8; p < 0.0001$).

A significant Movement \times Modality interaction, $\chi^2(3) = 598.511, p < 0.001$, showed that RTs were significantly shorter when an audiovisual looming stimulus was presented compared to unisensory looming stimuli (AL: $Z = -44.5, p < 0.0001$; VL: $Z = -6.79, p < 0.0001$), unisensory receding stimuli (AR: $Z = -43.81, p < 0.0001$; VR: $Z = -10.88, p < 0.0001$) and audiovisual receding stimuli ($Z = -5.3, p < 0.0001$). A Movement \times Modality \times Group interaction, $\chi^2(2) = 79.63, p < 0.0001$, showed interestingly that the AQ+ group was particularly faster in the audiovisual looming condition compared to the AQ- group, (AL: $Z = -35.93, p < 0.0001$; AR: $Z = -34.17, p < 0.0001$; VL: $Z = -13.93, p < 0.0001$; VR: $Z = -15.95, p < 0.0001$; AVR: $Z = -12.78, p < 0.0001$; see Fig. 21A).

A main effect of the speed revealed shorter RTs to fast stimuli relative to slow stimuli ($Z = -9.15, p < 0.0001$). As revealed by the Speed \times Group interaction, $\chi^2(1) = 8.62, p < 0.01$, the AQ+ group presented shorter RTs in fast conditions compared to the AQ- group, whatever the speed condition (slow: $Z = -8.4, p < 0.0001$; fast: $Z = -6.78, p < 0.0001$).

A Speed \times Modality interaction, $\chi^2(2) = 335.98, p < 0.001$, showed that RTs were significantly shorter in the audiovisual fast condition compared to unisensory fast ($V^F: Z = -6.73, p < 0.0001$; $A^F: Z = -44.29, p < 0.0001$), unisensory slow ($V^S: Z = -12.82, p < 0.0001$; $A^S: Z = -46.22, p < 0.0001$) and audiovisual slow ($Z = -7.18, p < 0.0001$) conditions. A Speed \times Modality \times Group interaction, $\chi^2(2) = 106.61, p < 0.0001$, revealed that the AQ+ group presented particularly shorter RTs in the audiovisual fast condition compared to the AQ- group,

whatever the condition ($A^F: Z = -35.93, p < 0.0001$; $A^S: Z = -35.55, p < 0.0001$; $V^F: Z = -13.53, p < 0.0001$; $V^S: Z = -17.69, p < 0.0001$; $AV^S: Z = -14.25, p < 0.0001$; see Fig. 21B).

There was a significant Speed \times Movement interaction, $\chi^2(1) = 26.83, p < 0.001$, demonstrating that RTs were shorter in the fast-loomng condition compared to slow movements ($L^S: Z = -7.44, p < 0.0001$; $R^S: Z = -8.32, p < 0.0001$) and fast receding ($Z = -2.81, p < 0.01$) condition.

Interestingly, a significant Speed \times Modality \times Movement interaction, $\chi^2(1) = 26.83, p < 0.001$, revealed particularly shorter RTs when an audiovisual fast-loomng stimulus was presented compared to all other conditions ($AL^F: Z = -32.02, p < 0.0001$; $AL^S: Z = -34.24, p < 0.0001$; $VL^F: Z = -5.29, p < 0.0001$; $VL^S: Z = -10.03, p < 0.0001$; $AR^F: Z = -32.23, p < 0.0001$; $AR^S: Z = -32.1, p < 0.0001$; $VR^F: Z = -8.65, p < 0.0001$; $VR^S: Z = -12.46, p < 0.0001$; $AVR^F: Z = -3.94, p < 0.0001$; $AVR^S: Z = -8.7, p < 0.0001$; $AVL^S: Z = -5.3, p < 0.0001$). It is important to add that shorter RTs in the audiovisual looming condition compared to unisensory conditions, as well as the audiovisual receding condition, were found in each speed presentation ($AL^S: Z = -31.22, p < 0.0001$; $VL^S: Z = -4.31, p < 0.0001$; $AR^S: Z = -29.95, p < 0.0001$; $VR^S: Z = -6.86, p < 0.0001$; $ARVR^S: Z = -3.62, p < 0.001$. For fast speed, $Z < -3.94, p < 0.0001$, see above).

Moreover, as indicated by a significant Speed \times Modality \times Movement \times Group interaction, $\chi^2(2) = 33.76, p = 0.0001$, the RTs of the AQ+ group in the audiovisual fast-loomng condition were shorter than those of the AQ- group, whatever the condition ($AL^F: Z = -26.26, p < 0.0001$; $VL^F: Z = -10.37, p < 0.0001$; $AVL^F: Z = -6.27, p < 0.0001$; $AR^F: Z = -25.36, p < 0.0001$; $VR^F: Z = -11.51, p < 0.0001$; $AVR^F: Z = -8.99, p < 0.0001$; $AL^S: Z = -26.53, p < 0.0001$; $VL^S: Z = -13.01, p < 0.0001$; $AVL^S: Z = -10.28, p < 0.0001$; $AR^S: Z = -24.22, p < 0.0001$; $VR^S: Z = -14.62, p < 0.0001$; $AVR^S: Z = -12.23, p < 0.0001$). Interestingly, the AQ+ group were faster in each experimental condition ($Z < -5.28, p < 0.0001$) compared to the AQ- group, except in auditory conditions.

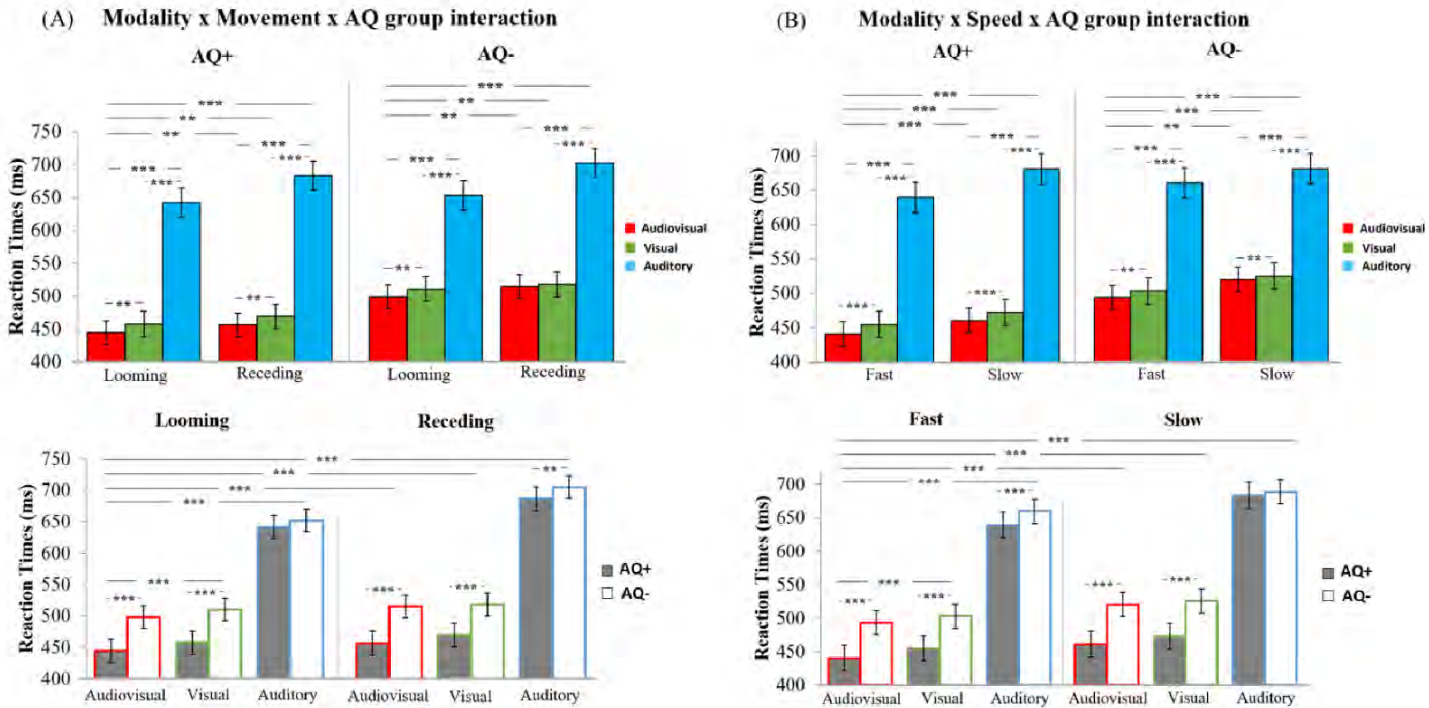


Figure 21. (A) Mean of reaction times (RTs) in looming and receding conditions across sensory modalities according to intragroup differences (at the top) and intergroup differences (at the bottom). Both Autism Spectrum Quotient (AQ) groups were faster in the audiovisual looming condition, and the AQ+ group presented particularly shorter RTs in such a condition. (B) Mean of RTs in fast and slow conditions across sensory modalities according to intragroup differences (at the top) and intergroup differences (at the bottom). Participants' RTs were shorter in the audiovisual fast condition, and the AQ+ group was significantly faster in this condition. Error bars represent the standard error of the mean (SEM). ***, $p < 0.0001$; **, $p < 0.001$.

3.3. Race Model Analysis

A race model analysis was applied to the RTs of all participants to determine whether shorter RTs in the multisensory condition exceeded the values predicted by the statistical summation of the fastest unisensory responses (see section 2.5.4. *Race Model Analysis*).

3.3.1. Intergroup Analysis

Permutation tests were computed to statistically compare the Miller inequalities between AQ groups. Significant group differences were found in the receding fast condition at the 15th percentile ($p < 0.01$), as well as in the looming fast condition from the 50th to the 55th percentile ($p < 0.05$; see Fig. 22).

3.3.2. Intragroup Analysis

Moreover, the reliability of the race model violations in each AQ group was computed. In both groups, significant violations of the model were found in the slow conditions — from the 0th to 10th percentile in the receding slow condition and from the ~5th to the 30th in the looming slow condition ($p < 0.05$). Interestingly, in fast conditions, the violation of the model occurred in a greater range of RTs in AQ+ than AQ- ($p < 0.05$; see Fig. 22).

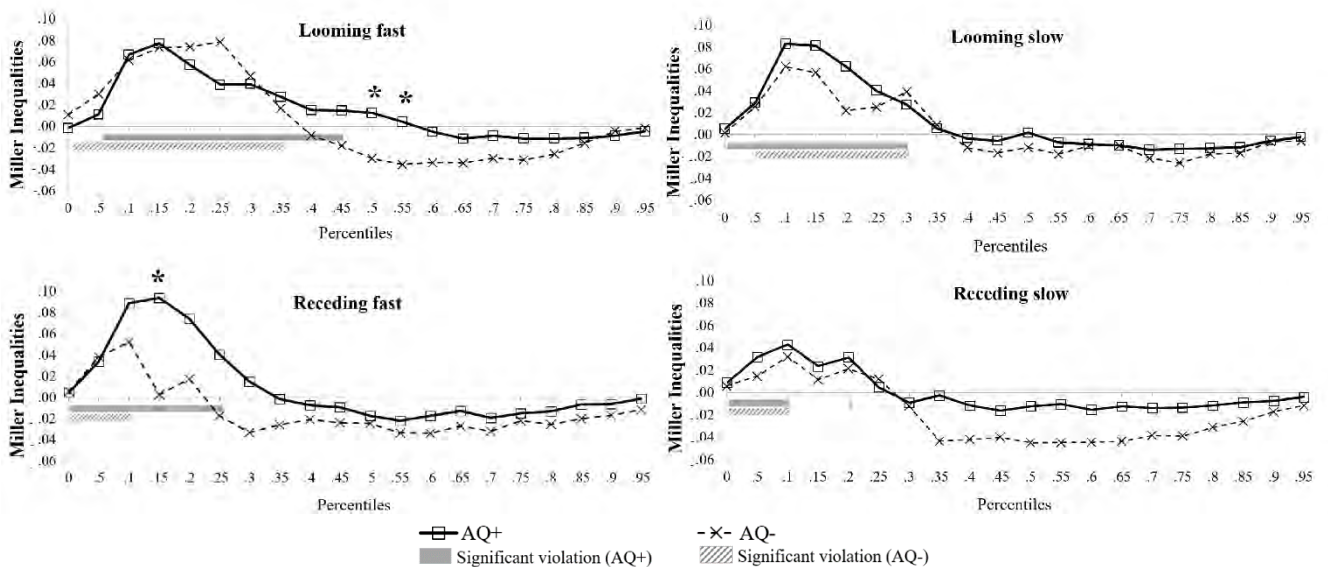


Figure 22. Results of applying Miller’s race model inequality to the cumulative probability distributions of the reaction time (RTs). The model is the arithmetic sum of the cumulative probabilities from unisensory and multisensory trials. The x-axis indicates the percentile of the RTs distribution. *, significant differences of Miller inequalities between Autism Spectrum Quotient (AQ) groups ($p < 0.05$). Significant violations of the race model in each AQ group are also indicated.

4. Discussion

Because autism is a spectrum disorder that extends into the general population, working on autistic personality traits could allow a better understanding of sensory particularities all along the spectrum. This study aimed at exploring the multisensory integration of depth cues across different speeds in the autistic personality spectrum, using a go/no-go detection task. Participants with a high-autistic personality (AQ+) were faster and better at discriminating moving information than participants with a low-autistic personality (AQ-). All participants presented multisensory facilitation in their RTs but this phenomenon was extended to the number of correct responses only for the AQ+ group. Moreover, the AQ+ group were particularly fast to detect audiovisual looming stimuli, as well as high-speed audiovisual stimuli. The application of a specific model of MSI highlighted different integrative interactions of high-speed stimuli in the AQ+ group.

The present study sample was mainly composed of females (73.68%). Any gender effect was found in participants' responses (RTs and accuracy). No study, to our knowledge, has explored the gender effect in multisensory integration using a simple detection paradigm with non-social stimuli, so gender was not further considered in the present study. More precisely, the gender effect on multisensory integration has only been demonstrated in paradigms exploring the integration of multisensory emotion expressions (Collignon *et al.*, 2010; Lin *et al.*, 2021). Other studies have shown controversial results regarding the McGurk effect (Mallick *et al.*, 2015; Traunmüller and Öhrström, 2007).

4.1. The Group Effect: Hypersensitivity to Sensory Events

As commonly found in the literature (e.g., Horder *et al.*, 2014; Mayer, 2017), AQ correlated with the sensory profile (AASP). Specifically, the more participants manifested autistic traits, the more they avoided sensations, presented higher sensory sensitivity, and inattention to certain stimuli (low registration). A hypersensitive individual will seek to protect himself from external stimuli by avoiding them and will manifest a poor attention span through being overloaded by sensory stimuli. Because our data highlighted a higher global sensory sensitivity in the AQ+ group compared to the AQ- group, it might be possible that the group effects observed in the behavioral task rely on a higher responsiveness to sensory stimulation. This is in line with sensory theories proposing hypersensitivity to sensory events as the core of ASD functioning.

Specifically, the intense world theory (Markram and Markram, 2010) showed evidence of hyperreactivity, hyperconnectivity, as well as hyperplasticity at the cortical (notably sensory cortex) and subcortical levels in ASD. These dysfunctions probably involve an imbalance in

the excitatory (glutamate) and inhibition (GABA) systems which was highlighted in ASD (the theory of E/I: Rubenstein and Merzenich, 2003) and the high-autistic personality (Kondo and Lin, 2020). According to Markram and Markram (2010), this cortical hyperfunctioning leads to hypersensitivity to sensory events, causing atypical sensory responses. A higher sensory sensitivity in AQ+ participants may have caused hyperreactivity to the stimuli displayed and consequently generated shorter RTs and a higher number of correct responses compared to AQ- participants. In addition, the study by Thillay *et al.* (2016) revealed an overanticipation in ASD participants when stimuli are randomly presented, i.e., in an unpredictable way, leading to overdetection. More concretely, the authors reported shorter RTs to detect a target in a random design associated with an amplitude increase in a cerebral component preceding the presentation of the stimulus (Contingent Negative Variation) in ASD. These results have been suggested to reflect enhanced preparatory mechanisms in ASD. In this vein, our experimental paradigm consisted of 15 different stimuli presented in random order, leading to a high variability of the information displayed which might have led to an overanticipation and a faster reactivity in AQ+. Clinically, overanticipation in subjects with ASD when the context is less predictable could be linked to their difficulties handling changes in everyday life. In EEG studies, change detection in ASD has been investigated based on the mismatch negativity component (MMN). In ASD, differences in this component were found when using complex social stimuli (Kovarski *et al.*, 2021), and simple visual and auditory stimuli (e.g., Cléry *et al.*, 2013; Green *et al.*, 2020). Atypical MMN was also reported in subjects without ASD but with high-autistic traits (Gayle *et al.*, 2012).

4.2. The Sensory Modality Effects

In line with previous studies using stationary/moving discrimination tasks of multisensory information (Cappe, Thut, et al., 2009; Harrison et al., 2010), participants were slower in the auditory modality. This is inconsistent with the current understanding of the auditory system, which exhibits a faster information processing time than the visual system, generally leading to shorter RTs (Shelton and Kumar, 2010). A tentative explanation of our results is related to the well-established expertise of the visual system for processing movement. Indeed, visual movement provides crucial information, such as locating a target and establishing the precise movements to catch it or avoid danger. In particular, correctly detecting depth movement allows us to avoid a threat or pursue a target, and may foster social interactions (Cappe, Thut, et al., 2009). Thus, spatial characteristics are fundamentally processed differently in the visual and auditory systems. More concretely, while the direction of movement within the visual

system is explicitly represented at the level of the single cell, the vast majority of neurons in the auditory system respond to specific ranges of acoustic frequencies once they have inputs from specific regions of the cochlea. At the cortical level, the specificity of the visual system to process motion is identified from V1 and spreads in many other cortical areas and mainly in the MT and MST areas (for a review, see Ilg, 2008). At the auditory level, while there is some evidence for motion sensitivity and direction selectivity in the A1 and the planum temporale (e.g., Alink *et al.*, 2012; Lewis, 2000), no specific auditory cortical region has been identified for processing motion. Thus, it is quite possible that the auditory information reaches the cortical networks of the auditory system more quickly but that the processing of moving information is less efficient than in the visual system, resulting at the behavioral level in a slower RT in the auditory modality.

Furthermore, as classically reported in detection tasks of unisensory and multisensory information, participants presented multisensory facilitation of their RTs, but interestingly, only AQ+ showed higher correct responses in the audiovisual condition relative to unisensory ones. In addition, AQ+ presented particularly short RTs to detect audiovisual stimuli. Some research investigating the multisensory integration of simple stimuli according to autistic traits in non-ASD subjects used the simultaneity judgment task (Donohue *et al.*, 2012), or the flash-beep illusion task (Yaguchi and Hidaka, 2018) to study the TBW. Their results indicated that the more autistic traits the participant had, the larger his TBW. The use of different approaches (temporal processing vs multisensory facilitation) to assess MSI does not make a direct comparison with our results relevant. However, it is possible that subjects with high-autistic traits present a widening of the TBW that facilitates MSI and consequently maximizes multisensory facilitation. Furthermore, one recent study (van Laarhoven *et al.*, 2019) using social stimuli (audiovisual speech) in a multitask paradigm to assess MSI in the autistic personality, revealed that a high AQ score was related to a reduced sensitivity to the McGurk illusion and a reduced visual enhancement of speech comprehensibility in noise. This is in line with results in the literature proposing alterations of MSI in ASD when using social information (for a review, see Feldman *et al.*, 2018). Moreover, studies using a multisensory detection task of simple non-social information are clinical comparative studies (ASD vs Control subjects) and have demonstrated either equal multisensory facilitation to controls (Brandwein *et al.*, 2015; de Boer-Schellekens *et al.*, 2013; Stefanou *et al.*, 2020; Stewart *et al.*, 2016) or degraded multisensory facilitation in subjects with ASD (Ainsworth *et al.*, 2021; Brandwein *et al.*, 2013; Collignon *et al.*, 2013; Molholm *et al.*, 2020; Ostrolenk *et al.*, 2019). Thus, our study is the first to investigate the mechanism of multisensory facilitation according to autistic traits and propose

it as being improved in subjects with high-autistic traits. This heterogeneity at the behavioral level could be the consequence of a distinct cortical network of MSI, as all studies using neuroimaging techniques demonstrated that sensory merging in ASD occurred at different topographies and latencies compared to control participants (Brandwein *et al.*, 2013, 2015; Molholm *et al.*, 2020; Russo *et al.*, 2010; Stefanou *et al.*, 2020). In addition, structural, anatomic, and functional differences in the superior temporal sulcus, an important site of audiovisual multisensory integration (for a review, see Beauchamp, 2010), have been demonstrated in participants with ASD compared to control participants (for a review, see Zilbovicius *et al.*, 2013). We can add that the authors of the enhanced perceptual functioning model, a well-established ASD model (Mottron and Burack, 2001; Mottron *et al.*, 2006), proposed that cerebral plasticity in low-level brain areas in ASD leads to enhanced activation in these specific brain areas, referred to as ‘areas of strength’, generating a preference toward a low level of processing. MSI implicates interactions of the primary cortexes between different areas of sensory processing (Cappe and Barone, 2005), meaning that the merging of the senses occurs in the early stages of sensory processing. Thus, it is quite possible that the merging of sensory information may be the core of a ‘surfunctioning’ mechanism leading to differences in brain integration of multisensory information.

4.3. The Speed Effect in our Experimental Paradigm

Participants with high-autistic traits (AQ+) manifested particularly shorter RTs in the fast-speed audiovisual conditions. In addition, a widely used MSI model (the race model) revealed a higher number of cues supporting integrative processes (model violations) in the fast-speed conditions for AQ+. Contrary to our results, many studies exploring the effect of speed on the perception of ASD showed response enhancement in slow-speed conditions, whether the stimuli used were unisensory (Lainé *et al.*, 2009; Tardif *et al.*, 2007) or multisensory (Lainé *et al.*, 2008; Meiss *et al.*, 2015; Tardif *et al.*, 2007). A tentative explanation for these discrepant results is that the effect of speed on participants' responses differs depending on the level of processing required in the experimental paradigm. More concretely, the methodological differences with the studies cited above may have led to these divergent results. The latter used complex social stimuli in behavioral imitation and emotion or word recognition paradigms. Considering the difficulties with tasks demanding high-level processing commonly highlighted in ASD (Mottron and Burack, 2001; Mottron *et al.*, 2006), a slower speed of presentation generates beneficial effects in processing information and establishing adapted behaviors in such complex tasks. This is in line with the current knowledge in ASD of an oversensitivity to simple, non-social stimuli; for

example, in clinical observations: the sound of “[...] alarms in general [...] caused a sensation inside my skull like the pain from a dentist's drill” and, conversely, difficulties in processing social material: “When grownups talked fast, I heard only the vowel sounds [...]. But by speaking slowly, the speech therapist helped me to hear the hard consonant sounds [...]” (Grandin, 1995). Beyond using simple, nonsocial stimuli, we used a simple detection task. A particularly well-documented finding is the excellence of subjects with ASD in such tasks. For instance, in visual search (e.g., Joseph *et al.*, 2009; Plaisted *et al.*, 1998), subjects with ASD manifest shorter RTs than control subjects. This superiority in visual search was also found in subjects without ASD but with high-autistic traits (R. A. Almeida *et al.*, 2010). It would be interesting to set up a study using tasks with progressive complexity to identify the level of processing that generates difficulties in ASD, which seems to be the focus of some current research (e.g., Ainsworth *et al.*, 2019, 2021; Stevenson *et al.*, 2018). Using a different population from the studies that worked on the effect of speed could also explain the inconsistency in the results.

An alternative explanation is associated with the linearity of motion processing particularities in the autistic spectrum. The present research focused on autistic traits in the general population, whereas the literature used participants with ASD. According to the dimensional model of ASD, the more autistic traits the person presents, the more the person suffers from sensory particularities. In this context, if we consider a linear expression of sensory particularities throughout the autistic spectrum, ASD individuals are at the extreme of the spectrum with a more severe impairment than autistic personality individuals. Thus, as overresponsiveness to sensory moving events was found in the high-autistic personality in this study, exacerbated with fast speed, the expression of such sensory particularities at the other extreme of the ASD spectrum is likely to be even more severe. In other words, if we find sensory particularities in people with high-autistic traits, these particularities will be more intensely expressed in ASD and thus lead to impairments. This could explain the pronounced difficulties in ASD in processing information at a fast speed and, consequently, the beneficial effect of slowing down the speed of presentation. This is in line with previous studies finding atypia in sensory processing in subjects without ASD but with high-autistic traits that were exacerbated in ASD subjects (e.g., Mayer, 2017; Takayama *et al.*, 2014).

In addition, we should mention that the characteristics of the stimuli differed according to the speed of presentation (the movement lasted 500 ms in slow-speed conditions and 250 ms in fast-speed conditions, after which the participant did not receive any information on the motion aspect of the stimulation). Consequently, the characteristics of the fast speed

stimulations induced the speed effect. Future investigations could investigate this effect by developing an experimental paradigm consisting of stimulation with different presentation durations.

4.4. The Specific Integration of Looming Signals

Participants manifested shorter RTs in the looming audiovisual conditions, whatever the presentation speed. We thus replicated the robust behavioral effect of multisensory integration of looming movement (Cappe, Thut, et al., 2009) and extended this result by using different speeds. According to the theory of the intense world (Markram and Markram, 2010), sensory hypersensitivity in ASD generates strategies such as preference selection and active avoidance of stimuli. Hyperpreference processing in the sensory domain could lead to exaggerated selectivity, sensitivity, and specialization of sensory features and hence hyperperception. Because looming signals are involved in social interaction, such social cues can be anxiety-inducing for ASD people and high-autistic personalities. Thus, the infant faced with looming movements during development could learn to actively avoid such high arousal level stimuli and to over-react to them. Indeed, Hu *et al.*, (2017) found in a very young ASD sample (3–4 years), a lack of behavioral reactivity to aversive looming signals associated with weak connectivity in a structural pathway involved in looming-evoked defensive responses. Similar results showed postural hyporeactivity to expansion movement in children of 7–11 years (Gepner and Mestre, 2002) and in an adolescent sample (12–15 years; Greffou *et al.*, 2012) but not in older participants (16–33 years; Greffou *et al.*, 2012). Taken together, these results suggest that sensitivity to looming movement could be dependent on social experience in the autistic spectrum. In addition, because the multisensory signal is all the more informative (auditory looming + visual looming), it is expected that people with high-autistic traits reacted faster to this one. As a speed effect was found in the present study, an adaptation to the speed presentation could be applied to react efficiently to the stimuli. Longitudinal studies would be useful to better define the developmental trajectory of looming movement integration within the autistic spectrum.

5. Summary

In conclusion, this study supports the presence of sensory particularities in people with high-autistic traits, particularly regarding the multisensory integration of looming cues and fast-moving stimuli. As our environment is predominantly dynamic and multisensory, studying such information is essential. This study contributes to better defining the difficulties experienced on a daily basis throughout the spectrum and supports evidence that low-level stages of multisensory integration may operate differently all along the autistic personality spectrum. These findings extend to the whole autistic spectrum the growing discussion about the subsequential effect of basic perceptual particularities on the development of social abilities.

Acknowledgements

We wish to thank Damien Matteo for contributing to generating the stimuli used in the present study. This work was supported by a doctoral grant from the University of Toulouse 2 (France) awarded to P. R. The authors have no competing interests to declare.

References

- Ainsworth, K., Falagiarda, F., Collignon, O. and Bertone, A. (2019). Time-resolved discrimination of audiovisual expressions of emotion in children with and without autism, *J. Vis.* 19, 20a. <https://doi.org/10.1167/19.10.20a>
- Ainsworth, K., Ostrolenk, A., Irion, C. and Bertone, A. (2021). Reduced multisensory facilitation exists at different periods of development in autism. *Cortex* 134, 195–206. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2020.09.031>
- Aleman, S., Blok, E., Jansen, P. R., Muetzel, R. L. and White, T. (2021). Brain morphology, autistic traits, and polygenic risk for autism : A population-based neuroimaging study. *Autism Res.* 14, 2085–2099. <https://doi.org/10.1002/aur.2576>
- Alink, A., Euler, F., Kriegeskorte, N., Singer, W. and Kohler, A. (2012). Auditory motion direction encoding in auditory cortex and high-level visual cortex, *Hum. Brain Mapp.* 33, 969–978. <https://doi.org/10.1002/hbm.21263>
- Almeida, R. A., Dickinson, J. E., Maybery, M. T., Badcock, J. C. and Badcock, D. R. (2010). Visual search performance in the autism spectrum II : The radial frequency search task with additional segmentation cues. *Neuropsychologia* 48, 4117–4124. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.10.009>
- Annaz, D., Campbell, R., Coleman, M., Milne, E. and Swettenham, J. (2012). Young children with autism spectrum disorder do not preferentially attend to biological motion. *J. Autism Dev. Disord.* 42, 401–408. <https://doi.org/10.1007/s10803-011-1256-3>
- APA (2013). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders, fifth ed/ (DSM-5)*. American Psychiatric Association, Washington, DC, USA. <https://doi.org/10.1176/appi.books.9780890425596>
- Ayres, A. J. and Tickle, L. S. (1980). Hyper-responsivity to touch and vestibular stimuli as a predictor of positive response to sensory integration procedures by autistic children, *Am. J. Occup. Ther.* 34, 375–381. <https://doi.org/10.5014/ajot.34.6.375>
- Baker, A. E. Z., Lane, A., Angley, M. T. and Young, R. L. (2008). The relationship between sensory processing patterns and behavioural responsiveness in autistic disorder : a pilot study. *J. Autism Dev. Disord.* 38, 867–875. <https://doi.org/10.1007/s10803-007-0459-0>

- Baron-Cohen, S. (1995). *Mindblindness : An Essay on Autism and Theory of Mind*. The MIT Press, Cambridge, MA, USA. <https://doi.org/10.7551/mitpress/4635.001.0001>
- Baron-Cohen, S., Wheelwright, S., Skinner, R., Martin, J. and Clubley, E. (2001). The autism-spectrum quotient (AQ): evidence from Asperger syndrome/high-functioning autism, males and females, scientists and mathematicians. *J. Autism Dev. Disord.* 31, 5-17. <https://doi.org/10.1023/A:1005653411471>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. and Walker, S. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4, *J. Stat. Softw.* 67, 1–48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Bayliss, A. P. and Tipper, S. P. (2005). Gaze and arrow cueing of attention reveals individual differences along the autism spectrum as a function of target context, *Br. J. Psychol.* 96, 95–114. <https://doi.org/10.1348/000712604X15626>
- Beauchamp, M. S. (2010). Biological motion and multisensory integration : the role of the superior temporal sulcus, in: *The Science of Social Vision*, R. B. Adams, N. Ambady, K. Nakayama and S. Shimojo (Éds.), pp. 409-420, Oxford University Press, Oxford, UK. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195333176.003.0024>
- Benjamini, Y. and Hochberg, Y. (1995). Controlling the false discovery rate : a practical and powerful approach to multiple testing, *J. R. Stat. Soc. Series B Methodol.* 57, 289-300. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1995.tb02031.x>
- Ben-Sasson, A., Hen, L., Fluss, R., Cermak, S. A., Engel-Yeger, B. and Gal, E. (2009). A meta-analysis of sensory modulation symptoms in individuals with autism spectrum disorders, *J. Autism Dev. Disord.* 39, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s10803-008-0593-3>
- Bertone, A., Mottron, L., Jelenic, P. and Faubert, J. (2003). Motion perception in autism : a “complex” issue, *J. Cogn. Neurosci.* 15, 218–225. <https://doi.org/10.1162/089892903321208150>
- Blake, R. and Shiffrar, M. (2007). Perception of human motion, *Annu. Rev. Psychol.* 58, 47–73. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.57.102904.190152>
- Brainard, D. H. (1997). The Psychophysics Toolbox, *Spat. Vis.* 10, 433–436. <https://doi.org/10.1163/156856897X00357>
- Brandwein, A. B., Foxe, J. J., Butler, J. S., Russo, N. N., Altschuler, T. S., Gomes, H. and Molholm, S. (2013). The development of multisensory integration in high-functioning autism : high-density electrical mapping and psychophysical measures reveal impairments in the processing of audiovisual inputs. *Cereb. Cortex* 23, 1329–1341. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhs109>
- Brandwein, A. B., Foxe, J. J., Butler, J. S., Frey, H.-P., Bates, J. C., Shulman, L. H. and Molholm, S. (2015). Neurophysiological indices of atypical auditory processing and multisensory integration are associated with symptom severity in autism, *J. Autism Dev. Disord.* 45, 230–244. <https://doi.org/10.1007/s10803-014-2212-9>
- Brown, C. and Dunn, W. (2002). *Adolescent/Adult Sensory Profile Manual*. Psychological Corporation, San Antonio, TX, USA.
- Brown, C. and Dunn, W. (2006). *Profil sensoriel – adolescent/adulte*. Pearson, San Antonio, TX. <https://www.pearsonclinical.ca/store/caassessments/en/Store/Professional-Assessments/Motor-Sensory/Functional/Profil-sensoriel%E2%80%94adolescent-adulte/p/P100008333.html>
- Cappe, C. and Barone, P. (2005). Heteromodal connections supporting multisensory integration at low levels of cortical processing in the monkey, *Eur. J. Neurosci.* 22, 2886-2902. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2005.04462.x>
- Cappe, C., Thut, G., Romei, V. and Murray, M. M. (2009). Selective integration of auditory-visual looming cues by humans, *Neuropsychologia* 47, 1045–1052. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2008.11.003>
- Centelles, L., Assaiante, C., Etchegoyhen, K., Bouvard, M. and Schmitz, C. (2013). From action to interaction : exploring the contribution of body motion cues to social understanding in typical development and in autism spectrum disorders, *J. Autism Dev. Disord.* 43, 1140-1150. <https://doi.org/10.1007/s10803-012-1655-0>
- Chen, Y.-H., Rodgers, J. and McConachie, H. (2009). Restricted and repetitive behaviours, sensory processing and cognitive style in children with autism spectrum disorders. *J. Autism Dev. Disord.* 39, 635–642. <https://doi.org/10.1007/s10803-008-0663-6>

- Clark, A. I., Hughes, P. S., Grube, M. and Stewart, M. E. (2013). Autistic traits and sensitivity to interference with flavour identification, *Autism Res.* 6, 332–336. <https://doi.org/10.1002/aur.1293>
- Cléry, H., Bonnet-Brilhault, F., Lenoir, P., Barthelemy, C., Bruneau, N. and Gomot, M. (2013). Atypical visual change processing in children with autism: An electrophysiological study, *Psychophysiology* 50, 240–252. <https://doi.org/10.1111/psyp.12006>
- Collignon, O., Girard, S., Gosselin, F., Saint-Amour, D., Lepore, F. and Lassonde, M. (2010). Women process multisensory emotion expressions more efficiently than men, *Neuropsychologia* 48, 2202–2205. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.09.007>
- Collignon, O., Charbonneau, G., Peters, F., Nassim, M., Lassonde, M., Lepore, F., Mottron, L. and Bertone, A. (2013). Reduced multisensory facilitation in persons with autism, *Cortex* 49, 1704–1710. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2012.06.001>
- de Boer-Schellekens, L., Eussen, M. and Vroomen, J. (2013). Diminished sensitivity of audiovisual temporal order in autism spectrum disorder, *Front. Integr. Neurosci.* 7, 8. <https://doi.org/10.3389/fnint.2013.00008>
- Donohue, S. E., Darling, E. F. and Mitroff, S. R. (2012). Links between multisensory processing and autism, *Exp. Brain Res.* 222, 377–387. <https://doi.org/10.1007/s00221-012-3223-4>
- Etymotic (2023). Model : ER3XR, Lucid Hearing Holding Company. <https://www.etymotic.com/product/er3xr-earphones/>
- Falck-Ytter, T., Bölte, S. and Gredebäck, G. (2013). Eye tracking in early autism research, *J. Neurodev. Disord.* 5, 28. doi: 10.1186/1866-1955-5-28
- Feldman, J. I., Dunham, K., Cassidy, M., Wallace, M. T., Liu, Y. and Woynaroski, T. G. (2018). Audiovisual multisensory integration in individuals with autism spectrum disorder: A systematic review and meta-analysis, *Neurosci. Biobehav. Rev.* 95, 220–234. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2018.09.020>
- Foss-Feig, J. H., Kwakye, L. D., Cascio, C. J., Burnette, C. P., Kadivar, H., Stone, W. L. and Wallace, M. T. (2010). An extended multisensory temporal binding window in autism spectrum disorders, *Exp. Brain Res.* 203, 381–389. <https://doi.org/10.1007/s00221-010-2240-4>
- Foxe, J. J., Molholm, S., Del Bene, V. A., Frey, H.-P., Russo, N. N., Blanco, D., Saint-Amour, D. and Ross, L. A. (2015). Severe multisensory speech integration deficits in high-functioning school-aged children with autism spectrum disorder (ASD) and their resolution during early adolescence. *Cereb. Cortex*, 25, 298–312. <https://doi.org/10.1093/cercor/bht213>
- Gayle, L. C., Gal, D. E. and Kieffaber, P. D. (2012). Measuring affective reactivity in individuals with autism spectrum personality traits using the visual mismatch negativity event-related brain potential, *Front. Hum. Neurosci.* 6, 334. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00334>
- Gepner, B. and Féron, F. (2009). Autism: A world changing too fast for a mis-wired brain? *Neurosci. Biobehav. Rev.* 33, 1227–1242. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.06.006>
- Gepner, B. and Mestre, D. (2002). Rapid visual-motion integration deficit in autism, *Trends Cogn. Sci.* 6, 455. [https://doi.org/10.1016/s1364-6613\(02\)02004-1](https://doi.org/10.1016/s1364-6613(02)02004-1)
- Grandin, T. (1995). *Ma Vie d'Autiste*. Odile Jacob, Paris, France.
- Green, H. L., Shuffrey, L. C., Levinson, L., Shen, G., Avery, T., Randazzo Wagner, M., Sepulveda, D. M., Garcia, P., Maddox, C., Garcia, F., Hassan, S. and Froud, K. (2020). Evaluation of mismatch negativity as a marker for language impairment in autism spectrum disorder, *J. Commun. Disord.* 87, 105997. <https://doi.org/10.1016/j.jcomdis.2020.105997>
- Greffou, S., Bertone, A., Hahler, E.-M., Hanssens, J.-M., Mottron, L. and Faubert, J. (2012). Postural hypo-reactivity in autism is contingent on development and visual environment: a fully immersive virtual reality study, *J. Autism Dev. Disord.* 42, 961–970. <https://doi.org/10.1007/s10803-011-1326-6>
- Grinter, E. J., Van Beek, P. L., Maybery, M. T. and Badcock, D. R. (2009a). Brief report: visuospatial analysis and self-rated autistic-like traits, *J. Autism Dev. Disord.* 39, 670–677. <https://doi.org/10.1007/s10803-008-0658-3>
- Grinter, E. J., Maybery, M. T., Van Beek, P. L., Pellicano, E., Badcock, J. C. and Badcock, D. R. (2009b). Global visual processing and self-rated autistic-like traits, *J. Autism Dev. Disord.* 39, 1278–1290. <https://doi.org/10.1007/s10803-009-0740-5>

- Harrison, N. R., Wuerger, S. M. and Meyer, G. F. (2010). Reaction time facilitation for horizontally moving auditory–visual stimuli, *J. Vis.* 10, 16. <https://doi.org/10.1167/10.14.16>
- Hazen, E. P., Stornelli, J. L., O’Rourke, J. A., Koesterer, K. and McDougle, C. J. (2014). Sensory symptoms in autism spectrum disorders, *Harv. Rev. Psychiatry* 22, 112–124. <https://doi.org/10.1097/01.HRP.0000445143.08773.58>
- Hilton, C., Graver, K. and LaVesser, P. (2007). Relationship between social competence and sensory processing in children with high functioning autism spectrum disorders, *Res. Autism Spectrum Disord.* 1, 164–173. <https://doi.org/10.1016/j.rasd.2006.10.002>
- Hobson, R. P. (1992). Autism and Asperger’s Syndrome. *British Journal of Psychiatry*, 161(6), 872-872. <https://doi.org/10.1192/S0007125000131381>
- Hoekstra, R. A., Bartels, M., Cath, D. C. and Boomsma, D. I. (2008). Factor structure, reliability and criterion validity of the autism-spectrum quotient (AQ) : a study in Dutch population and patient groups. *J. Autism Dev. Disord.* 38, 1555–1566. <https://doi.org/10.1007/s10803-008-0538-x>
- Horder, J., Wilson, C. E., Mendez, M. A. and Murphy, D. G. (2014). Autistic traits and abnormal sensory experiences in adults, *J. Autism Dev. Disord.* 44, 1461–1469. <https://doi.org/10.1007/s10803-013-2012-7>
- Hu, Y., Chen, Z., Huang, L., Xi, Y., Li, B., Wang, H., Yan, J., Lee, T. M. C., Tao, Q., So, K.-F. and Ren, C. (2017). A translational study on looming-evoked defensive response and the underlying subcortical pathway in autism, *Sci. Rep.* 7, 14755. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15349-x>
- Ilg, U. J. (2008). The role of areas MT and MST in coding of visual motion underlying the execution of smooth pursuit, *Vis. Res.* 48, 2062–2069. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2008.04.015>
- Johansson, G. (1973). Visual perception of biological motion and a model for its analysis, *Percept. Psychophys.* 14, 201–211. <https://doi.org/10.3758/BF03212378>
- Joseph, R. M., Keehn, B., Connolly, C., Wolfe, J. M. and Horowitz, T. S. (2009). Why is visual search superior in autism spectrum disorder? *Dev. Sci.* 12, 1083–1096. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2009.00855.x>
- Keane, B. P., Rosenthal, O., Chun, N. H. and Shams, L. (2010). Audiovisual integration in high functioning adults with autism, *Res. Autism Spectrum Disord.* 4, 276–289. <https://doi.org/10.1016/j.rasd.2009.09.015>
- Kempnaers, C., Braun, S., Delvaux, N. and Linkowski, P. (2017). The assessment of autistic traits with the Autism Spectrum Quotient : Contribution of the French version to its construct validity, *Eur. Rev. Appl. Psychol.* 67, 299–306. <https://doi.org/10.1016/j.erap.2017.09.001>
- Kondo, H. M. and Lin, I.-F. (2020). Excitation-inhibition balance and auditory multistable perception are correlated with autistic traits and schizotypy in a non-clinical population, *Sci. Rep.* 10, 8171. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65126-6>
- Kovarski, K., Charpentier, J., Roux, S., Batty, M., Houy-Durand, E. and Gomot, M. (2021). Emotional visual mismatch negativity : a joint investigation of social and non-social dimensions in adults with autism. *Translat. Psychiatry*, 11, 10. <https://doi.org/10.1038/s41398-020-01133-5>
- Kwakye, L. D., Foss-Feig, J. H., Cascio, C. J., Stone, W. L. and Wallace, M. T. (2011). Altered auditory and multisensory temporal processing in autism spectrum disorders, *Front. Integr. Neurosci.* 4, 129. <https://doi.org/10.3389/fnint.2010.00129>
- Lainé, F., Tardif, C. and Gepner, B. (2008). Amélioration de la reconnaissance et de l’imitation d’expressions faciales chez des enfants autistes grâce à une présentation visuelle et sonore ralentie, *Ann. Med.-Psychol.* 166, 533–538. <https://doi.org/10.1016/j.amp.2005.09.032>
- Lainé, F., Rauzy, S., Gepner, B. and Tardif, C. (2009). Prise en compte des difficultés de traitement des informations visuelles et auditives rapides dans le cadre de l’évaluation diagnostique de l’autisme, *Enfance*, 2009, 133–141. <https://doi.org/10.4074/S0013754509001153>
- Lainé, F., Rauzy, S., Tardif, C. and Gepner, B. (2011). Slowing down the presentation of facial and body movements enhances imitation performance in children with severe autism, *J. Autism Dev. Disord.* 41, 983–996. <https://doi.org/10.1007/s10803-010-1123-7>
- Lane, A. E., Young, R. L., Baker, A. E. Z. and Angley, M. T. (2010). Sensory processing subtypes in autism : association with adaptive behavior, *J. Autism Dev. Disord.* 40, 112–122. <https://doi.org/10.1007/s10803-009-0840-2>

- Lewis, J. W. (2000). A comparison of visual and auditory motion processing in human cerebral cortex, *Cereb. Cortex* 10, 873–888. <https://doi.org/10.1093/cercor/10.9.873>
- Lin, Y., Ding, H. and Zhang, Y. (2021). Unisensory and multisensory Stroop effects modulate gender differences in verbal and nonverbal emotion perception, *J. Speech Lang. Hear. Res.* 64, 4439–4457. https://doi.org/10.1044/2021_JSLHR-20-00338
- Loveland, K. A., Tunali-Kotoski, B., Chen, R., Brelsford, K. A., Ortegon, J. and Pearson, D. A. (1995). Intermodal perception of affect in persons with autism or Down syndrome, *Dev. Psychopathol.* 7, 409-418. <https://doi.org/10.1017/S095457940000660X>
- Maier, J. X., Chandrasekaran, C. and Ghazanfar, A. A. (2008). Integration of bimodal looming signals through neuronal coherence in the temporal lobe, *Curr. Biol.* 18, 963–968. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2008.05.043>
- Mallick, D. B., Magnotti, J. F. and Beauchamp, M. S. (2015). Variability and stability in the McGurk effect : contributions of participants, stimuli, time, and response type, *Psychon. Bull. Rev.* 22, 1299-1307. <https://doi.org/10.3758/s13423-015-0817-4>
- Marco, E. J., Hinkley, L. B. N., Hill, S. S. and Nagarajan, S. S. (2011). Sensory processing in autism : a review of neurophysiologic findings, *Pediat. Res.* 69, 48–54. <https://doi.org/10.1203/PDR.0b013e3182130c54>
- Markram, K. and Markram, H. (2010). The intense world theory – a unifying theory of the neurobiology of autism, *Front. Hum. Neurosci.* 4, 224. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2010.00224>
- The MathWorks Inc. (2022). MATLAB version: 9.13.0 (R2022b), Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc. <https://www.mathworks.com>
- Mayer, J. L. (2017). The relationship between autistic traits and atypical sensory functioning in neurotypical and ASD adults : a spectrum approach. *J. Autism Dev. Disord.* 47, 316–327. <https://doi.org/10.1007/s10803-016-2948-5>
- Meiss, E., Tardif, C., Arciszewski, T., Dauvier, B. and Gepner, B. (2015). Effets positifs d’une exposition à des séquences vidéo ralenties sur l’attention, la communication sociale et les troubles du comportement chez 4 enfants autistes sévères : une étude translationnelle pilote, *Neuropsychiatr. Enfance Adolesc.* 63, 302–309. <https://doi.org/10.1016/j.neurenf.2015.01.004>
- Miller, J. (1982). Divided attention : Evidence for coactivation with redundant signals. *Cogn. Psychol.* 14, 247–279. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(82\)90010-X](https://doi.org/10.1016/0010-0285(82)90010-X)
- Molholm, S., Murphy, J. W., Bates, J., Ridgway, E. M. and Foxe, J. J. (2020). Multisensory audiovisual processing in children with a sensory processing disorder (I) : behavioral and electrophysiological indices under speeded response conditions, *Front. Integr. Neurosci.* 14, 4. <https://doi.org/10.3389/fnint.2020.00004>
- Mottron, L. and Burack, J. A. (2001). Enhanced perceptual functioning in the development of autism, in: *The Development of Autism : Perspectives from Theory and Research*, J. A. Burack, T. Charman, N. Yirmiya and P. R. Zelazo (Eds), pp. 131–148, Lawrence Erlbaum Associates , New York, NY, USA. <https://doi.org/10.4324/9781410600196-14>
- Mottron, L., Dawson, M., Soulières, I., Hubert, B. and Burack, J. (2006). Enhanced Perceptual Functioning in Autism : An Update, and Eight Principles of Autistic Perception. *J. Autism Dev. Disord.* 36(1), 27-43. <https://doi.org/10.1007/s10803-005-0040-7>
- Neuhoff, J. G. (1998). Perceptual bias for rising tones, *Nature*, 395, 123–124. <https://doi.org/10.1038/25862>
- Neuhoff, J. G. (2001). An Adaptive Bias in the Perception of Looming Auditory motion, *Ecol. Psychol.* 13, 87–110. https://doi.org/10.1207/S15326969ECO1302_2
- Newman, R. S., Kirby, L. A., Von Holzen, K. and Redcay, E. (2021). Read my lips ! Perception of speech in noise by preschool children with autism and the impact of watching the speaker’s face, *J. Neurodev. Disord.* 13, 4. <https://doi.org/10.1186/s11689-020-09348-9>
- Noel, J.-P., Stevenson, R. A. and Wallace, M. T. (2018). Atypical audiovisual temporal function in autism and schizophrenia : similar phenotype, different cause., *Eur. J. Neurosci.* 47, 1230–1241. <https://doi.org/10.1111/ejn.13911>
- O’Connor, K. (2007). Brief report : impaired identification of discrepancies between expressive faces and voices in adults with Asperger’s syndrome, *J. Autism Dev. Disord.* 37, 2008–2013. <https://doi.org/10.1007/s10803-006-0345-1>
- Okazolab (2023). EventIDE version 2017.1.2, Ltd, London, UK. <https://www.okazolab.com/>

- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory, *Neuropsychologia* 9, 97–113. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(71\)90067-4](https://doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4)
- Ostrolenk, A., Bao, V. A., Mottron, L., Collignon, O. and Bertone, A. (2019). Reduced multisensory facilitation in adolescents and adults on the Autism Spectrum, *Sci. Rep.* 9, 11965. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48413-9>
- Plaisted, K., O’Riordan, M. and Baron-Cohen, S. (1998). Enhanced visual search for a conjunctive target in autism: a research note, *J. Child Psychol. Psychiatry* 39, 777–783.
- Robertson, C. E. and Baron-Cohen, S. (2017). Sensory perception in autism, *Nat. Rev. Neurosci.* 18, 671–684. <https://doi.org/10.1038/nrn.2017.112>
- Rubenstein, J. L. R. and Merzenich, M. M. (2003). Model of autism: increased ratio of excitation/inhibition in key neural systems. *Genes Brain Behav.* 2, 255–267. <https://doi.org/10.1034/j.1601-183X.2003.00037.x>
- Russo, N., Foxe, J. J., Brandwein, A. B., Altschuler, T., Gomes, H. and Molholm, S. (2010). Multisensory processing in children with autism: high-density electrical mapping of auditory–somatosensory integration, *Autism Res.* 3, 253–267. <https://doi.org/10.1002/aur.152>
- Ruzich, E., Allison, C., Smith, P., Watson, P., Auyeung, B., Ring, H. and Baron-Cohen, S. (2015). Measuring autistic traits in the general population: a systematic review of the Autism-Spectrum Quotient (AQ) in a nonclinical population sample of 6,900 typical adult males and females, *Mol. Autism* 6, 2. <https://doi.org/10.1186/2040-2392-6-2>
- Shelton, J. and Kumar, G. P. (2010). Comparison between Auditory and visual simple reaction times, *Neurosci. Med.* 1, 30–32. <https://doi.org/10.4236/nm.2010.11004>
- Smith, E. G. and Bennetto, L. (2007). Audiovisual speech integration and lipreading in autism, *J. Child Psychol. Psychiat.* 48, 813–821. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2007.01766.x>
- Stefanou, M. E., Dundon, N. M., Bestelmeyer, P. E. G., Ioannou, C., Bender, S., Biscaldi, M., Smyrnis, N. and Klein, C. (2020). Late attentional processes potentially compensate for early perceptual multisensory integration deficits in children with autism: evidence from evoked potentials, *Sci. Rep.* 10, 16157. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73022-2>
- Stein, B. E. (Ed.). (2012). *The New Handbook of Multisensory Processing*. MIT Press, Cambridge, MA, USA.
- Stein, B. E. and Meredith, M. A. (1993). *The merging of the senses*. MIT Press, Cambridge, MA, USA.
- Stevenson, J. L. and Hart, K. R. (2017). Psychometric properties of the Autism-Spectrum Quotient for assessing low and high levels of autistic traits in college students, *J. Autism Dev. Disord.* 47, 1838–1853. <https://doi.org/10.1007/s10803-017-3109-1>
- Stevenson, R. A., Siemann, J. K., Woynaroski, T. G., Schneider, B. C., Eberly, H. E., Camarata, S. M. and Wallace, M. T. (2014). Evidence for diminished multisensory integration in autism spectrum disorders, *J. Autism Dev. Disord.* 44, 3161–3167. <https://doi.org/10.1007/s10803-014-2179-6>
- Stevenson, R. A., Segers, M., Ncube, B. L., Black, K. R., Bebko, J. M., Ferber, S. and Barense, M. D. (2018). The cascading influence of multisensory processing on speech perception in autism, *Autism* 22, 609–624. <https://doi.org/10.1177/1362361317704413>
- Stewart, M. E. and Ota, M. (2008). Lexical effects on speech perception in individuals with “autistic” traits, *Cognition* 109, 157–162. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2008.07.010>
- Stewart, C. R., Sanchez, S. S., Grenesko, E. L., Brown, C. M., Chen, C. P., Keehn, B., Velasquez, F., Lincoln, A. J. and Müller, R.-A. (2016). Sensory symptoms and processing of nonverbal auditory and visual stimuli in children with autism spectrum disorder, *J. Autism Dev. Disord.* 46, 1590–1601. <https://doi.org/10.1007/s10803-015-2367-z>
- Takayama, Y., Hashimoto, R., Tani, M., Kanai, C., Yamada, T., Watanabe, H., Ono, T., Kato, N. and Iwanami, A. (2014). Standardization of the Japanese version of the Glasgow Sensory Questionnaire (GSQ), *Res. Autism Spectrum Disord.* 8, 347–353. <https://doi.org/10.1016/j.rasd.2013.12.017>
- Tardif, C., Lainé, F., Rodriguez, M. and Gepner, B. (2007). Slowing down presentation of facial movements and vocal sounds enhances facial expression recognition and induces facial–vocal imitation in children with autism, *J. Autism Dev. Disord.* 37, 1469–1484. <https://doi.org/10.1007/s10803-006-0223-x>

- Thillay, A., Lemaire, M., Roux, S., Houy-Durand, E., Barthélémy, C., Knight, R. T., Bidet-Caulet, A. and Bonnet-Brilhault, F. (2016). Atypical brain mechanisms of prediction according to uncertainty in autism. *Front. Neurosci.* 10, 317. <https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00317>
- Todorova, G. K., Hatton, R. E. M. and Pollick, F. E. (2019). Biological motion perception in autism spectrum disorder : a meta-analysis, *Mol. Autism* 10, 49. <https://doi.org/10.1186/s13229-019-0299-8>
- Traunmüller, H. and Öhrström, N. (2007). Audiovisual perception of openness and lip rounding in front vowels, *J. Phon.* 35, 244–258. <https://doi.org/10.1016/j.wocn.2006.03.002>
- van Laarhoven, T., Stekelenburg, J. J. and Vroomen, J. (2019). Increased sub-clinical levels of autistic traits are associated with reduced multisensory integration of audiovisual speech, *Sci. Rep.* 9, 9535. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46084-0>
- von dem Hagen, E. A. H., Stoyanova, R. S., Baron-Cohen, S. and Calder, A. J. (2013). Reduced functional connectivity within and between ‘social’ resting state networks in autism spectrum conditions, *Soc. Cogn. Affect. Neurosci.* 8, 694–701. <https://doi.org/10.1093/scan/nss053>
- Voos, A. C., Pelphey, K. A. and Kaiser, M. D. (2013). Autistic traits are associated with diminished neural response to affective touch, *Soc. Cogn. Affect. Neurosci.* 8, 378–386. <https://doi.org/10.1093/scan/nss009>
- Williams, D. (1999). *Nobody Nowhere : The Remarkable Autobiography of an Autistic Girl*. Jessica Kingsley Publishers, London, UK.
- Woynaroski, T. G., Kwakye, L. D., Foss-Feig, J. H., Stevenson, R. A., Stone, W. L. and Wallace, M. T. (2013). Multisensory speech perception in children with autism spectrum disorders, *J. Autism Dev. Disord.* 43, 2891–2902. <https://doi.org/10.1007/s10803-013-1836-5>
- Xavier, J., Vignaud, V., Ruggiero, R., Bodeau, N., Cohen, D. and Chaby, L. (2015). A multidimensional approach to the study of emotion recognition in autism spectrum disorders. *Front. Psychol.* 6, 1954. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01954>
- Yaguchi, A. and Hidaka, S. (2018). Distinct autistic traits are differentially associated with the width of the multisensory temporal binding window, *Multisens. Res.* 31, 523–536. <https://doi.org/10.1163/22134808-00002612>
- Zilbovicius, M., Saitovitch, A., Popa, T., Rechtman, E., Diamandis, L., Chabane, N., Brunelle, F., Samson, Y. and Boddaert, N. (2013). Autism, social cognition and superior temporal sulcus, *Open J. Psychiatr.* 3, 46–55. <https://doi.org/10.4236/ojpsych.2013.32A008>

Supplementary materials for the manuscript “[What makes the detection of movement different within the autistic traits spectrum? Evidence from the audiovisual depth paradigm]”

1. Additional Correlation Analysis

To complete the comparative analysis initially applied in this study, the linear relationship between the two personality questionnaires (global scores of AQ and AASP, as well as dimensions of both instruments) was detailed. Then, the link between the responses in a detection task of depth movements (% CR and RTs) and personality questionnaires (global scores of AQ and AASP, as well as dimensions of both instruments) were computed. To avoid redundant results and make this section readable, correlation analyses were first computed between the mean of responses (RTs and % CR) in all conditions combined and the personality questionnaires. Second, the correlation between responses (RTs and % CR) in each experimental condition and the personality questionnaires were reported. To do so, Pearson's correlations were applied with the critical p -value of 0.05.

1.1. Correlation between the Personality Questionnaires

Several correlations were found by computing correlation analysis between the AQ and the AASP (see Table 5).

Table 5. Pearson correlation matrix between the autistic quotient (AQ) and the sensory profile (AASP)

	AQ total	Social skills	Att. switch	Att. to detail	Comm.	Imag.
AASP total	0.57***	0.39**	0.55***	0.32*	0.35**	0.31**
Taste/Smell Processing	0.39**	0.22*	0.31**	0.25	0.32**	0.23*
Movement Processing	0.23*	0.04*	0.31**	0.29	-0.09*	0.22*
Visual Processing	0.49**	0.37**	0.48***	0.23	0.34**	0.22*
Touch Processing	0.56***	0.51***	0.41**	0.21	0.33**	0.42***
Activity Level	0.22*	0.12*	0.32**	0.27	0.14*	-0.13*
Auditory Processing	0.50***	0.32**	0.51***	0.16	0.38**	0.31**
Low Registration	0.47***	0.39**	0.40**	-0.01	0.35**	0.46***
Sensation Seeking	-0.34*	-0.35**	-0.31**	0.07	-0.20*	-0.34*
Sensory Sensitivity	0.57***	0.37**	0.58***	0.29	0.30**	0.35**
Sensation Avoiding	0.60***	0.46***	0.57***	0.37*	0.36**	0.24**

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$

1.2. Correlation Analysis between the Personality Questionnaires and the Rate of Correct Responses (% CR) in Go Conditions

No significant correlation was found between % CR in go conditions (all conditions combined) and the personality questionnaires. By computing the correlation between % CR in each experimental conditions and personality questionnaires, we found a positive correlation between the dimension of the AQ ‘Attention switching’ and % CR in the visual receding movement at slow ($r = 0.35, p < 0.05$), and fast speed ($r = 0.34, p < 0.05$) on the one hand and on the other hand, with % CR in the audiovisual slow speed in looming ($r = 0.4, p < 0.05$) and receding movements ($r = 0.43, p < 0.01$). Taken together these results indicated that the more the participants had attentional flexibility difficulties, the more they presented correct responses to discriminate visual receding movement, whatever the speed, and slow audiovisual depth movement, whatever the direction of the movement. Interestingly, the % CR in the AVL^F condition negatively correlated with the dimension of the AASP ‘Sensation seeking’ ($r = -0.4, p < 0.05$), suggesting that the more participants searched for sensory stimulation, the less they correctly discriminated fast multisensory looming stimuli. No other significant correlations were found between % CR and the other dimensions of both questionnaires (AQ and AASP).

1.3. Correlation Analysis between Personality Questionnaires and Reaction Times (RTs)

A significant negative correlation was found between the mean of RTs in all conditions combined and the dimension of the AQ ‘Social skills’ ($r = -0.4, p < 0.05$) indicating that the more the participants had social difficulties, the faster they detected depth movement. By computing the correlation between each experimental condition and the personality questionnaires, negative correlations between each experimental condition and the score in the ‘social skills’ dimension were found, except in auditory conditions (see Table 6). No other significant correlations were found between % CR and the other dimensions of both questionnaires (AQ and AASP).

Table 6. Results of correlation analysis between the RTs in each experimental condition and the dimension of the AQ evaluating difficulties in social interaction

			AQ (Social skills)
AV	Fast	L	$r = -0.4, p < 0.05$
		R	$r = -0.41, p < 0.05$
	Slow	L	$r = -0.41, p < 0.05$
		R	$r = -0.41, p < 0.05$
V	Fast	L	$r = -0.44, p < 0.05$
		R	$r = -0.39, p < 0.05$
	Slow	L	$r = -0.41, p = 0.01$
		R	$r = -0.42, p < 0.01$
A	Fast	L	ns
		R	ns
	Slow	L	ns
		R	ns

2.1.2 Etude 2

Etude en cours : extension de l'étude du continuum autistique au TSA

Le recrutement des participants TSA est toujours en cours. Des données préliminaires seront présentées.

Nous avons souhaité étudier l'intégration multisensorielle du mouvement en profondeur dans le spectre autistique. Pour ce faire, nous avons privilégié une approche dimensionnelle du spectre, en considérant le profil autistique de sujets TSA mais aussi de sujets non-TSA.

Le modèle dimensionnel suggère une expression linéaire des particularités autistiques (sensorielles, comportementales, neuro-anatomiques, etc.) au sein du spectre autistique dans lequel chaque individu, quel que soit son profil clinique ou non-clinique, prend place. Cela signifie qu'il y aurait une manifestation progressive des particularités autistiques le long du spectre, avec une manifestation plus faible d'un côté (personnes non-TSA) et une expression substantielle à l'autre extrême (personnes TSA). Néanmoins, bien que consensuelle, cette notion reste hypothétique puisqu'aucune preuve empirique n'a confirmé l'extension des particularités autistiques dans la population générale (Sasson & Bottema-Beutel, 2022). Dans la présente étude basée sur des données préliminaires, nous avons recruté des participants TSA et comparé leurs réponses aux sujets AQ+ et AQ- de l'étude 1 (Poulain et al., 2023). Cela nous a permis d'aborder le spectre au sens large et de tester la linéarité des particularités sensorielles au sein de l'ensemble du spectre autistique. Étant donné que cette étude a investi les mêmes questionnaires, le même paradigme expérimental et les mêmes stimuli que l'étude comportementale précédente, ces sections ne seront pas présentées ici. Au niveau des résultats statistiques, nous nous concentrerons principalement sur les différences intergroupes.

6. Matériel et méthode

6.1. Participants

Les trente-huit participants non-TSA provenaient de l'étude 1 (Poulain et al., 2023). Ils étaient âgés de 18 à 25 ans (moyenne = 22.23, écart-type = 1.95). Ces participants ont été divisés en deux groupes selon le score médian à l'AQ, résultant en un groupe avec un AQ élevé (AQ+, n = 19, homme = 7) et un groupe avec un AQ faible (AQ-, n = 19, homme = 3). Dix-sept sujets avec un TSA ont participé à l'étude dont un sujet a été exclu suite à un nombre insuffisant de réponses correctes à la tâche expérimentale (voir la section 1.2.1 ci-dessous). Au total, seize participants avec un TSA ont été inclus (6 hommes), âgés de 19 à 29 ans (moyenne = 23.12, écart-type = 2.55, Table 7). Le diagnostic de TSA a été établi par une équipe de cliniciens à l'aide de l'*Autism Diagnostic Observation Schedule* (ADOS-G ou ADOS-2; (Lord et al., 2000, 2012) et/ou de l'*Autism Diagnostic Interview-Revised* (ADI-R; Lord et al., 1994). Évalués à partir des subtests de la WAIS-IV (Vocabulaire, Similarité, Cubes de Kohs, Matrices de Raven; Wechsler, 2008), aucun participant ne présentait d'indices de retard intellectuel (score aux subtests dans la norme). Tous les participants avaient une audition normale et une vision normale ou corrigée et ne présentaient aucun antécédent de maladie neurologique ou psychiatrique. L'étude a été approuvée par un comité d'éthique de la recherche (Comité de Protection des Personnes Sud Méditerranée III, Avis N° 2020-A03056-33). Tous les participants ont fourni un consentement éclairé écrit et ont reçu une compensation monétaire. Les participants ont pris part à l'étude en une seule session de deux heures. Les traits autistiques et le profil sensoriel des participants ont été évalués à l'aide de deux questionnaires au format papier-crayon puis les participants ont effectué une tâche expérimentale informatisée.

Table 7. Description des participants

	AQ-	AQ+	ASD	F(df)	p-value
Age	22.22 ±2.28 (18-25) ^a	22.27 ±1.53 (20-25) ^a	23.12 ±2.55 (19-29) ^a	.4(2)	.4
AQ global score	11.16 ±3.28 (3-14) ^a	22.43 ±5.92 (15-36) ^b	31.75 ±6.13 (22-41) ^c	68.53(2)	< .0001
Social skills	1.22 ±1.23 ^a	4.11 ±2.38 ^b	6.82 ±2.54 ^c	31(2)	< .0001
Att. Switching	3 ±1.3 ^a	6.11 ±1.89 ^b	7.63 ±1.67 ^c	37.23(2)	< .0001
Att. to detail	3.58 ±2.15 ^a	5 ±1.92 ^b	5.75 ±2.33 ^b	4.8(2)	< .05
Communication	1.79 ±1.19 ^a	3.32 ±2.39 ^b	6.57 ±2.45 ^c	23.86(2)	< .0001
Imagination	1.581.79 ±1.39 ^a	3.9 ±2.19 ^b	5 ±1.55 ^c	17.71(2)	< .0001
AASP global score	146.06 ±19.78 (92-177) ^a	168.58 ±18.14 (133-207) ^b	181.88 ±19.86 (143-206) ^c	15.69(2)	< .0001
Taste/Smell Processing	19.85 ±3.75 ^a	23.27 ±3.29 ^b	21.57 ±3.78 ^b	4.3(2)	< .05
Movement Processing	19.79 ±4.51 ^a	21.95 ±3.72 ^a	22.69 ±5.34 ^a	2(2)	.15
Visual Processing	23.11 ±3.95 ^a	26.85 ±5.16 ^b	28.94 ±4.03 ^c	7.89(2)	< .01
Touch Processing	28.37 ±5.52 ^a	34.64 ±4.04 ^b	37.69 ±4.87 ^c	17.14(2)	< .0001
Activity Level	26.16 ±3.69 ^a	28.37 ±5.48 ^b	33.13 ±4.21 ^c	10.52(2)	< .001
Auditory Processing	28.79 ±5.08 ^a	33.53 ±7.14 ^b	37.88 ±5.1 ^c	10.4(2)	< .001
Low Registration	29.22 ±7.17 ^a	35 ±7.18 ^b	42.32 ±5.29 ^c	16.75(2)	< .0001
Sensation Seeking	50.16 ±7.45 ^a	48.32 ±8.18 ^a	42.38 ±9.02 ^b	4.2(2)	< .05
Sensory Sensitivity	33.27 ±7.11 ^a	42.9 ±10.83 ^b	49.57±8.58 ^c	14.64(2)	< .0001
Sensation Avoiding	33.43 ±8.75 ^a	42.43 ±8.51 ^b	47.63 ±10.7 ^c	10.62(2)	< .001
N	19 (3 males)	19 (7 males)	16 (6 males)	-	-

Afin de tester les différences intergroupes aux questionnaires, des ANOVA ont été effectuées.

a–c Les valeurs avec des lettres différentes ont été significativement différentes à $p < .05$ selon les tests post-hoc de Tukey.

1.2 Analyses statistiques

1.2.1 Analyse des réponses correctes et des temps de réaction

L'analyse statistique a concerné les réponses dont les temps de réaction étaient compris entre 150 ms et 1000 ms. Les participants avec moins de 10 réponses par condition *go* ont été exclus. Des modèles linéaires généralisés à effets mixtes (GLMM) similaires à ceux de notre étude précédente (Poulain et al., 2023) ont été utilisés, sauf que le groupe TSA a été ajouté aux effets fixes des modèles. Ainsi, la modalité (Auditif vs. Visuel vs. Audiovisuel), le mouvement (Approche vs. Eloignement), la vitesse (Rapide vs. Lent) et le groupe (AQ- vs AQ+ vs TSA) ont été considérés comme des effets fixes tandis que le paramètre Sujet a été considéré comme un effet aléatoire. Pour rappel, le GLMM des réponses correctes a été calculé avec une famille binomiale et le GLMM des temps de réaction a été calculé en utilisant une famille de distribution gamma. Pour tester statistiquement les GLMM, des tests de Chi-carré de Wald ont été utilisés et des tests *post-hoc* ont ensuite été effectués en utilisant des tests de Wilcoxon avec une correction *False Discovery Rate correction* (FDR; Benjamini & Hochberg, 1995). Les résultats ont été considérés comme significatifs à $p < .05$.

1.2.2 Analyse du modèle de la course

Nous avons testé si la facilitation multisensorielle reflétait des interactions intégratives en appliquant le modèle de la course (Miller, 1982). De manière similaire à notre étude précédente (Poulain et al., 2023), les valeurs du modèle de la course (inégalités de Miller) ont été comparées entre les groupes (AQ- vs AQ+ vs TSA) à l'aide de tests de permutation non paramétriques (10 000 permutations) basés sur la statistique *t*. Les mêmes tests statistiques ont été utilisés pour tester la significativité de la violation du modèle dans chaque groupe.

2. Résultats

2.1 Analyse des réponses correctes et des temps de réaction

La performance moyenne est de 88% dans les conditions *go* (erreur type = .008%) et 84% dans les conditions *no go* (erreur type = .03%). Concernant les réponses correctes, aucun effet de groupe ni d'interaction avec le groupe n'a été retrouvé ($p > .05$, Fig. 23).

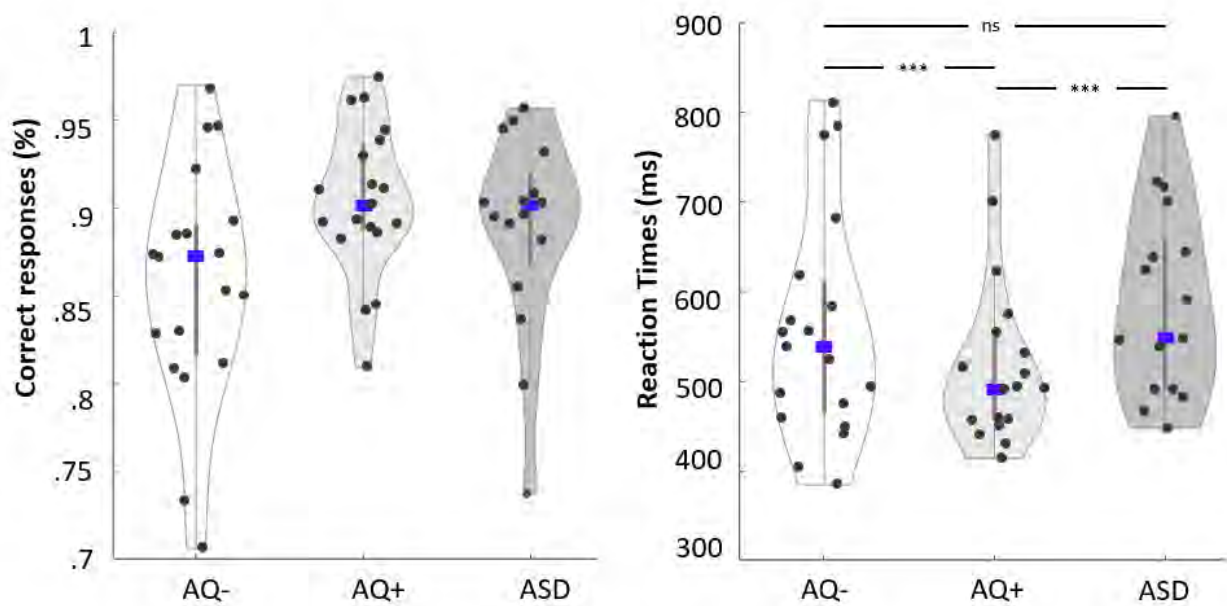


Figure 23. Taux de réponses correctes et temps de réaction selon les groupes. Pour représenter les résultats du GLMM binomial (1 = réponse correcte ; 0 = réponse incorrecte), les valeurs binaires du modèle ont été transformées en taux de réponses correctes. La médiane, l'écart interquartile et la densité sont représentés. *** $p < .0001$; *ns* non-significatif.

Au niveau des temps de réaction (TR), tel qu'indiqué par un effet du Groupe ($\chi^2(2) = 31.01, p < .0001$), nous avons retrouvé des TR plus courts dans le groupe AQ+ par rapport au groupe AQ- mais également par rapport au groupe TSA ($p < .0001$, Fig. 23). Aucune différence significative n'a été mise en évidence entre le groupe AQ- et le groupe TSA ($p = .18$, Fig. 23). Une interaction Modalité x Groupe ($\chi^2(4) = 41.23, p < .0001$) a révélé que les groupes TSA et AQ+ étaient plus rapides en condition audiovisuelle relativement au groupe AQ-, ce qui correspond aux résultats de l'étude 1 (Poulain et al., 2023). Notons également que le groupe AQ+ était plus rapide que le groupe TSA dans cette condition ($p < .05$, Fig. 24). En outre, les participants TSA ont manifesté des TR plus longs en condition auditive relativement aux deux autres groupes AQ ($p < .05$; Fig. 24). Ajoutons que pour l'ensemble des groupes, AQ-, AQ+ et TSA, les temps de réaction étaient plus courts en condition audiovisuelle par rapport aux conditions visuelles et auditives, ce qui a montré la présence de facilitation multisensorielle dans chaque groupe ($p < .05$; Fig. 24).

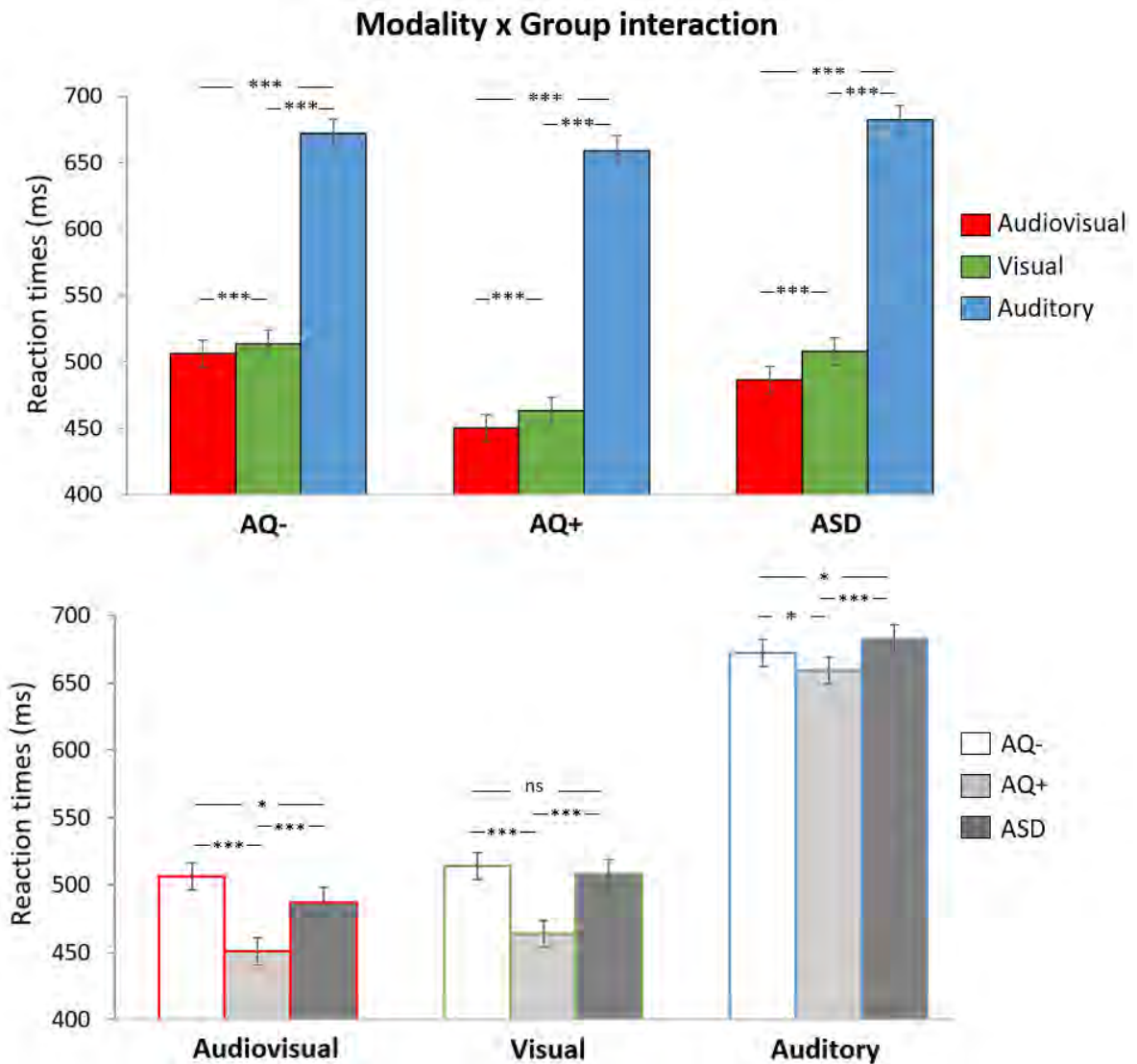


Figure 24. Temps de réaction dans les modalités sensorielles pour chacun des groupes. Moyenne des temps de réaction dans les modalités sensorielles selon les différences intragroupes (en haut) et les différences intergroupes (en bas). Chaque groupe a présenté une facilitation multisensorielle. Le groupe AQ+ était plus rapide dans chaque condition et plus particulièrement dans la condition audiovisuelle. Le groupe TSA a présenté des TR plus courts dans la condition audiovisuelle par rapport au groupe AQ- et des TR plus longs dans la condition auditive par rapport aux deux autres groupes AQ. *** $p < .0001$; * $p < .05$; *ns* non-significatif

Une interaction Modalité x Mouvement x Groupe ($\chi^2(4) = 9.55, p < .05$) a permis de retrouver des TR particulièrement plus courts pour le groupe AQ+ dans la condition audiovisuelle en approche par rapport au groupe AQ- mais également comparé au groupe TSA ($p < .0001$). Dans la condition auditive en éloignement, le groupe TSA a présenté des TR plus longs par rapport aux groupes AQ- et AQ+ ($p < .05$). Notons que chaque groupe a présenté des TR plus courts dans la condition audiovisuelle en approche comparée aux autres conditions ($p < .0001$, Fig. 25A). Seuls les groupes AQ+ et TSA ont manifesté une facilitation multisensorielle pour le mouvement en éloignement ($p < .0001$, Fig. 25A).

Nous avons retrouvé des TR plus courts pour le groupe AQ+ dans la condition audiovisuelle en vitesse rapide par rapport au groupe AQ- mais également par rapport au groupe TSA (interaction Modalité x Vitesse x Groupe ; $\chi^2(4) = 11.55, p < .05$). Les participants TSA ont manifesté des TR plus longs dans la condition auditive lente par rapport aux autres groupes AQ ($p < .05$). De plus, chaque groupe a présenté des TR particulièrement courts en condition audiovisuelle en vitesse rapide mais seulement les groupes AQ+ et TSA ont présenté une facilitation multisensorielle dans la condition de vitesse lente ($p < .0001$, voir Fig. 25B).

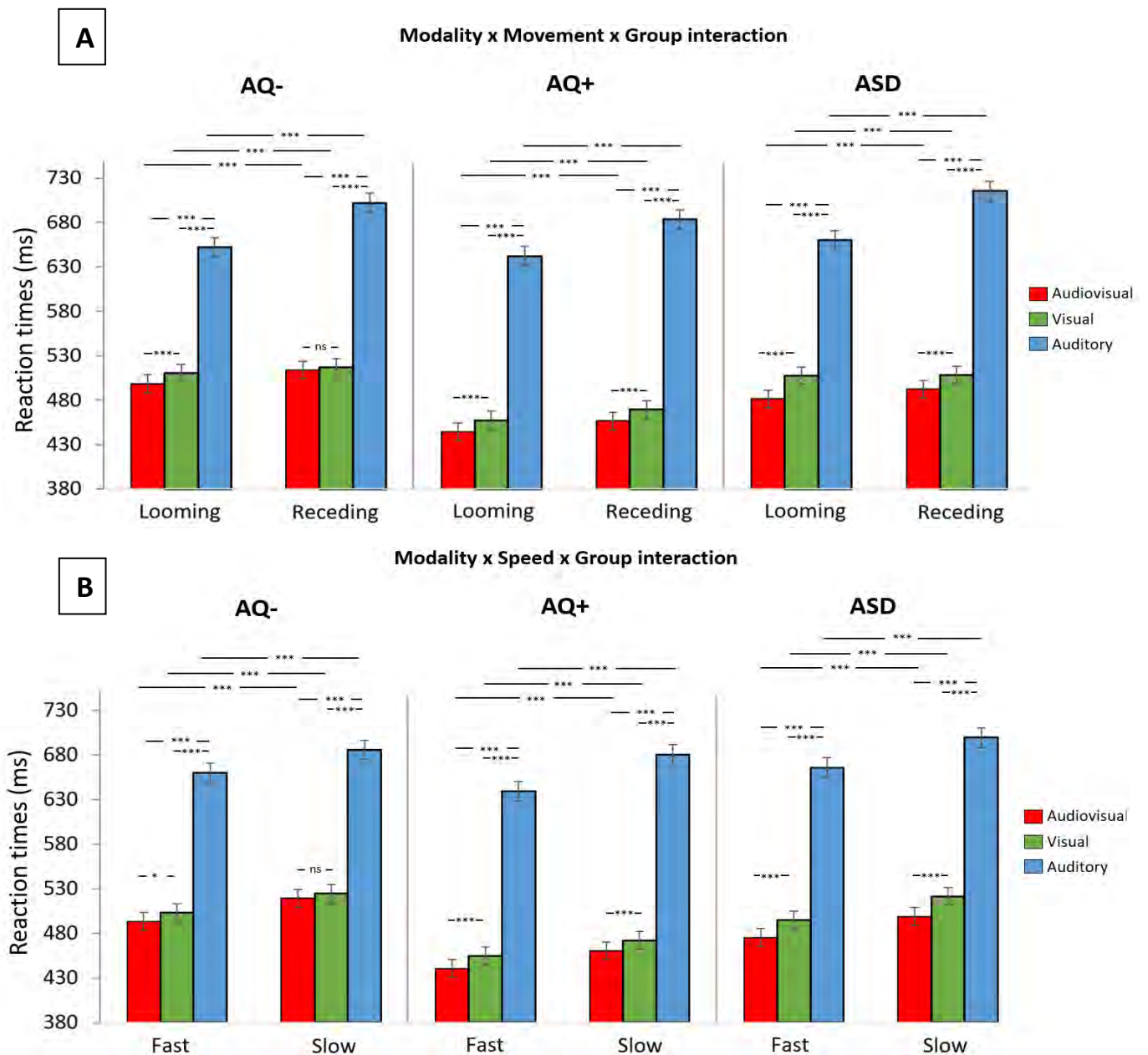


Figure 25. (A) Moyenne des temps de réaction dans les conditions en approche et en éloignement pour chaque modalité sensorielle et pour chacun des groupes. Chaque groupe était plus rapide dans la condition audiovisuelle en approche et le groupe AQ+ a présenté des TR particulièrement plus courts dans une telle condition. (B) Moyenne des temps de réaction dans des conditions rapides et lentes pour chaque modalité sensorielle et pour chacun des groupes. Les TR des participants étaient plus courts dans la condition audiovisuelle rapide et le groupe AQ+ a présenté des TR particulièrement plus courts dans une telle condition. Les barres d'erreur représentent l'erreur type. *** $p < .0001$; * $p < .05$; *ns* non-significatif

2.2 Analyse du modèle de la course

L'analyse du modèle de la course de Miller (1982) a été appliquée aux TR de tous les participants pour déterminer si les TR plus courts dans la condition multisensorielle dépassaient les valeurs prédites par la sommation statistique.

Analyse intergroupe. Des tests de permutation ont été utilisés pour comparer statistiquement les inégalités de Miller entre les groupes. Au-delà des différences entre le groupe AQ+ et AQ- dans la condition en éloignement (15e percentile) et en approche (50-55e percentile) présentée à vitesse rapide décrite dans l'étude 1 (Poulain et al., 2023), le groupe TSA a présenté des inégalités de Miller significativement plus élevées par rapport au groupe AQ- dans la condition d'éloignement en vitesse rapide du 15e au 30e percentile ($p < .05$). Aucune différence intergroupe n'a été mise en évidence entre le groupe TSA et le groupe AQ+.

Analyse intragroupe. Outre les violations significatives du modèle de la course au sein des groupes AQ+ et AQ- décrites dans l'étude 1 (Poulain et al., 2023), le groupe TSA a présenté davantage de violations du modèle que les groupes AQ- et AQ+ dans les conditions de vitesse lente ($p < .05$, Fig. 26). De plus, le groupe TSA a présenté des violations du modèle plus importantes que le groupe AQ- dans la condition en éloignement à vitesse rapide ($p < .05$, Fig. 26).

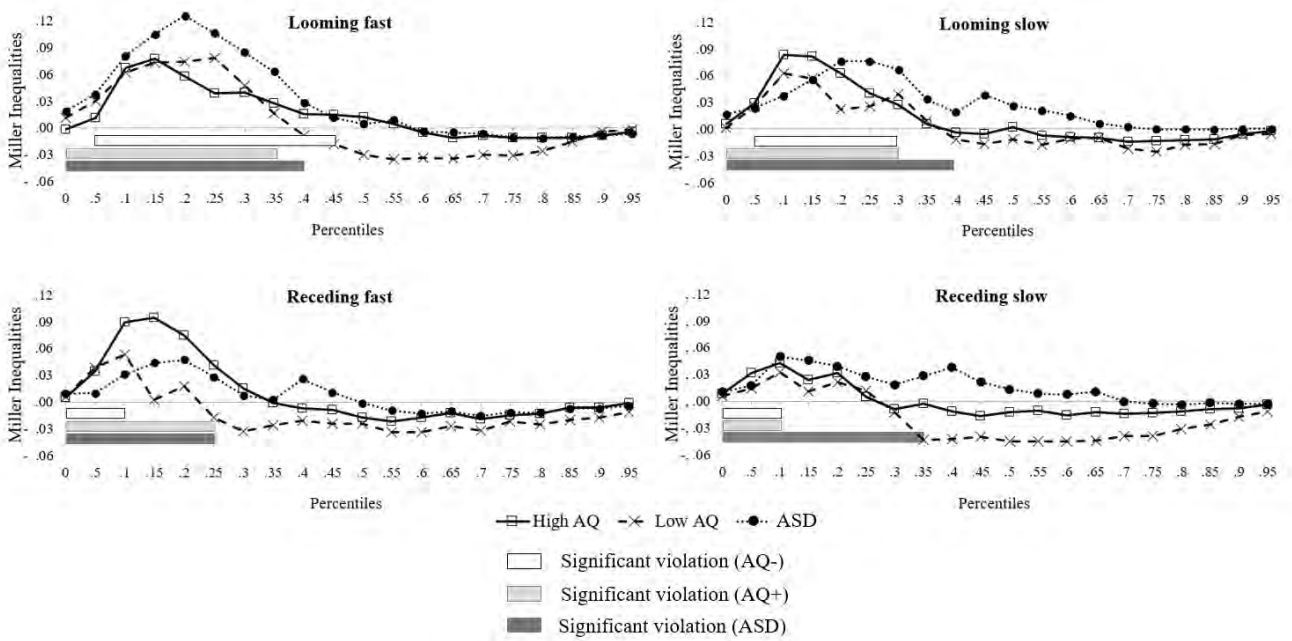


Figure 26. Analyse du modèle de la course (Miller, 1982). L'axe des ordonnées indique les valeurs d'inégalités de Miller. L'axe des abscisses correspond à la distribution des TR organisée en percentiles. Les violations significatives du modèle dans chaque groupe sont indiquées.

3. Discussion

Dans la présente étude, l'intégration multisensorielle (IMS) de mouvements en profondeur a été explorée le long du spectre autistique (personnalité autistique et TSA). La tâche de détection Go/No Go a mis en évidence une discontinuité dans les capacités de détection du mouvement en profondeur le long du spectre. Plus concrètement, en considérant l'ensemble des conditions (modalité/mouvement/vitesse), alors que les sujets TSA n'ont montré aucune différence de temps de réaction par rapport aux sujets à faible personnalité autistique (AQ-), les sujets AQ+ eux sont plus rapides. Toutefois, davantage d'indices d'IMS ont été mis en évidence dans le groupe à personnalité autistique élevée (AQ+) et dans le groupe TSA. Ce fut particulièrement le cas pour le mouvement en éloignement. L'ensemble de ces résultats suggère des différences d'intégration multisensorielle selon le groupe autistique, avec des similitudes et des dissemblances entre le groupe AQ+ et le groupe TSA.

Facilitation multisensorielle

Les résultats ont révélé une facilitation multisensorielle dans chaque groupe (AQ-, AQ+ et TSA). Jusqu'à présent, la littérature portant sur l'IMS à partir de stimuli simples et non sociaux dans le TSA met en évidence des résultats controversés, certains montrant la présence d'une facilitation multisensorielle, d'autres non (Feldman et al., 2018). Les études explorant les corrélats neuronaux de l'IMS dans le TSA suggèrent que cette diversité des résultats comportementaux pourrait être liée à l'implication d'un réseau cortical différent dans le TSA pour intégrer des informations multisensorielles (par exemple, Brandwein et al., 2013; Dwyer et al., 2022; Stefanou et al., 2020). Ici, les participants AQ+ et TSA ont présenté des similitudes dans l'IMS, avec des temps de réaction plus rapides en condition audiovisuelle ainsi que des violations du modèle de Miller plus importantes relativement au groupe AQ-. Nous pourrions ainsi envisager des similitudes concernant les corrélats neuronaux de l'IMS entre le groupe AQ+ et TSA. Nous avons le projet de développer une étude avec un enregistrement EEG chez des participants TSA qui permettra de tester plus spécifiquement cette hypothèse. En outre, et tel que proposé dans l'étude 1, une sensibilité sensorielle plus élevée dans le groupe AQ+ et le groupe TSA pourrait avoir guidé des temps de réaction plus courts dans la condition multisensorielle. En effet, si une sensibilité sensorielle plus élevée est communément décrite chez les individus TSA par rapport aux individus non-TSA (par exemple, Markram & Markram, 2010; Mayer, 2017; Takayama et al., 2014), une corrélation des seuils de détection visuelle et auditive avec le niveau des traits autistiques a également été rapportée chez des participants non

TSA (Schulz & Stevenson, 2020). Un tel résultat suggère que le niveau de sensibilité sensorielle serait fortement associé aux traits autistiques. Dans notre étude, une sensibilité sensorielle plus élevée chez les participants AQ+ et TSA, intensifiée avec la présentation de plusieurs modalités sensorielles, pourrait avoir causée une hyper-réactivité aux stimuli multisensoriels et par conséquent généré des temps de réaction plus courts et des violations du modèle de Miller plus importantes. Nous pouvons envisager que lorsqu'il s'agit de contenus sociaux (expressions faciales, mouvements oculaires, voix, prosodie, etc.), une telle hypersensibilité sensorielle pourrait entraîner une saturation de la charge perceptive, générant une altération de l'IMS d'informations sociales. Plus précisément, une étude récente a trouvé une diminution de la sévérité des difficultés sociales dans le TSA lorsque le nombre d'informations sensorielles présentées aux participants est diminué (Haskins et al., 2022). Cela pourrait expliquer les difficultés dans le TSA à intégrer des stimuli multisensoriels complexes sociaux (Feldman et al., 2018), ce qui a été démontré à partir de plusieurs tâches telles que la discrimination des émotions, la parole dans le bruit (*speech in noise*) et dans des tâches testant l'effet McGurk. Dans la personnalité autistique, l'IMS de stimuli sociaux a été testée à partir de l'effet McGurk et une IMS plus faible chez les sujets à personnalité autistique élevée a été retrouvée (Ujiie et al., 2015; Ujiie & Takahashi, 2021). Afin de tester plus encore la relation entre le niveau de sensibilité sensorielle avec les capacités d'IMS, des analyses de corrélation (pearson) ont été effectuées entre la moyenne des temps de réaction dans chaque condition audiovisuelle et les scores de sensibilité sensorielle des participants mais aucun résultat significatif n'a été retrouvé ($r < .09$, $p > .51$). D'autres analyses de corrélation (pearson) ont été effectuées entre les valeurs d'inégalités de Miller de chaque condition et les scores de sensibilité sensorielle. Pour ce faire, la valeur maximale d'inégalités de Miller par sujet et par condition a été utilisée. Aucune corrélation n'a été retrouvée ($r < .16$, $p > .25$). Une telle absence de corrélations suggérerait que les particularités d'IMS, telles qu'évaluées à partir d'indices comportementaux dans la présente étude, ne s'expriment pas de façon linéaire dans le continuum autistique. Cela pourrait être lié à la présence d'une rupture dans le continuum autistique lors du passage du subclinique (personnalité autistique) à la clinique (TSA) concernant l'intégration multisensorielle. Puisque nous émettons l'hypothèse que la sensibilité sensorielle a un effet particulièrement délétère sur l'IMS de stimuli sociaux, il serait particulièrement intéressant d'aller tester ce lien dans le TSA et la personnalité autistique.

De plus, une telle hyper-réactivité aux mouvements de profondeur multisensoriels pourrait entraîner des difficultés au quotidien, dans lequel il est nécessaire d'intégrer des informations dynamiques à tout instant t. Plusieurs autobiographies ont fait référence à une surcharge

sensorielle et à des difficultés à donner un sens aux stimuli multisensoriels, par exemple : "Noise and confusion of large gatherings of people overwhelmed my senses" (Grandin & Scariano, 1986, p. 14), "Sometimes the channels get confused, as when sounds come through as color. Sometimes I know that something is coming in somewhere, but I can't tell right away what sense it's coming through" (Cesaroni & Garber, 1991, p. 305).

Intégration multisensorielle de mouvements en profondeur

De plus, au sein de chaque groupe (AQ-, AQ+ et TSA), les participants ont été plus rapides à détecter les stimuli multisensoriels en approche. Un tel résultat a mis en évidence des effets d'intégration spécifiques pour le mouvement en approche au sein de chacun des groupes, tel que proposé dans l'étude de Cappe et al. (2009). Puisque le mouvement en approche pourrait traduire une menace potentielle, y réagir rapidement assurerait notre sécurité, voire notre survie. Ainsi, les TR plus courts des participants pourraient être la conséquence de la valeur écologique du mouvement en approche qui est particulièrement crucial au quotidien et pour lequel une réaction rapide permettrait d'éviter un potentiel danger.

Si dans l'ensemble, les participants AQ+ et TSA ont montré davantage d'indices d'IMS relativement aux participants AQ-, cela était particulièrement le cas dans la condition en éloignement. Le mouvement en éloignement pourrait être transposé dans la personnalité autistique élevée et le TSA à la tendance à s'isoler en s'éloignant du contact social, ce qui est communément mis en évidence dans le TSA (Dawson et al., 1998, 2004). L'ensemble des individus régule l'espace interpersonnel pour obtenir une distance d'interaction avec les autres qui leur est confortable. Cet espace fait référence à l'espace péripersonnel que Gessaroli et ses collaborateurs (2013) ont étudié dans le TSA en utilisant notamment le mouvement en éloignement de soi ou d'une autre personne. Les résultats ont indiqué un plus grand espace péripersonnel dans le TSA, reflétant un comportement d'évitement social. Les participants TSA agissaient comme s'ils se sentaient menacés par la simple proximité sociale. Cela met en évidence l'importance du mouvement en éloignement chez les individus TSA. Nous pouvons envisager qu'afin d'ajuster la distance sociale, les comportements d'évitement par éloignement sont fréquemment investis dans le TSA, entraînant un apprentissage dans la perception sensorielle associée à ces comportements et en conséquence à des capacités d'IMS plus importantes. Cela est notamment en lien avec des études (Powers et al., 2009; Stevenson et al., 2013) qui montrent que l'IMS est modulable selon l'expérience sensorielle.

En outre, relevons qu'au questionnaire du AASP, aucune différence intergroupe n'a été trouvée concernant la dimension du traitement du mouvement. Au niveau de nos résultats

comportementaux, puisque les différences intergroupes concernaient uniquement les temps de détection du mouvement (TR) et non pas les capacités de détection (échouées/réussies, tel que reflétaient par les %RC), il est possible que les items du questionnaire soient liés aux capacités de détection qui étaient préservées entre les groupes. En effet, les items du traitement du mouvement dans le AASP relèvent des préférences telles que « J'aime la sensation de mouvement », « Je choisis de pratiquer des activités physiques », « Je n'aime pas le mouvement qu'implique un voyage en voiture ». La préférence pour le mouvement pourrait être modulée par la capacité à détecter du mouvement qui, puisque similaire entre les groupes, n'a révélé aucune différence intergroupe à la dimension du AASP.

Perception auditive

Tous les participants (AQ-, AQ+, TSA) étaient plus lents dans la modalité auditive. Comme proposé dans l'étude 1, l'absence d'une région corticale auditive spécifique pour le traitement du mouvement pourrait expliquer les difficultés à discriminer ces informations. Le groupe TSA a présenté des temps de réaction particulièrement longs dans les conditions auditives comparé aux participants non-TSA, alors que le taux de bonnes réponses ne diffère pas, ce qui suggère qu'ils auraient besoin de plus de temps pour détecter du mouvement auditif (théorie de détection du signal, Green & Swets, 1966; Macmillan & Creelman, 1991). En ce sens, la littérature rapporte des performances de discrimination auditive réduites dans le TSA à mesure que les stimuli deviennent plus complexes et/ou que les exigences exécutives ou motrices des tâches augmentent (Dawson et al., 1998, 2004; Fujikawa-Brooks et al., 2010; Gervais et al., 2004; Källstrand et al., 2010; Kuhl et al., 2005; Lepistö et al., 2009; Teder-Sälejärvi et al., 2005). Nos résultats sont ainsi les premiers à suggérer des difficultés de traitement de stimuli auditifs en mouvement, mises en évidence à partir d'une tâche simple de détection. Puisqu'aucune étude n'avait auparavant étudié les capacités de détection de mouvement auditif dans le TSA, il serait intéressant d'étudier si les difficultés de détection retrouvées dans la présente étude sont spécifiques au mouvement en profondeur, ou si elles concernent également d'autres mouvements (par exemple, en translation).

Puisqu'il y a des conséquences neurales du traitement unisensoriel sur l'intégration multisensorielle, de telles difficultés de discrimination auditive pourraient avoir favorisé l'IMS chez les participants TSA. Plus concrètement, l'une des règles d'IMS propose que plus la réactivité aux stimuli unisensoriels diminue, plus la force de l'intégration multisensorielle augmente (règle d'efficacité inverse ; Stein & Meredith, 1993).

Effet de la vitesse

Au sein de chaque groupe (AQ-, AQ+ et TSA), les temps de réaction étaient plus courts en vitesse rapide et cela était le cas pour chacune des modalités sensorielles. Puisqu'en vitesse rapide le mouvement dure 250 ms alors qu'il dure 500 ms en vitesse lente, le stimulus se compose d'une quantité d'informations renseignant le mouvement plus importante en vitesse rapide qu'en vitesse lente. Le nombre d'informations relatives au mouvement s'accumulant de manière plus rapide pourrait clarifier la nature du stimulus et faciliter la détection du mouvement pour des stimuli en vitesse rapide. Cela signifierait que l'ensemble des sujets TSA et non-TSA seraient capables de traiter l'information sensorielle en mouvement lorsque celle-ci est simple et non-sociale, en temps réel et cela même dans une condition de vitesse rapide.

De précédentes études ont mis en évidence l'effet bénéfique du ralentissement de la vitesse de présentation dans des tâches de compréhension du langage (Lainé et al., 2009; Tardif et al., 2002) ou encore de reconnaissance et imitations d'expressions faciales (Lainé et al., 2008; Tardif et al., 2007). Or, dans notre étude, le ralentissement de la vitesse n'a pas amélioré les capacités de détection du mouvement des participants (taux de bonnes réponses) mais a, au contraire, ralenti leur temps de réaction. Ces résultats vont à l'encontre de nos hypothèses de départ, puisque nous nous attendions selon la théorie d'un désordre de traitement temporo-spatial (Gepner & Féron, 2009) à ce que les performances soient améliorées en vitesse lente. Il est donc possible d'envisager que l'effet de la vitesse diffère selon le niveau de traitement investi dans le paradigme expérimental. Compte tenu des difficultés couramment mises en évidence dans le TSA pour des tâches exigeant un traitement de haut niveau (Mottron et al., 2006; Mottron & Burack, 2001), une vitesse de présentation ralentie génèrerait des effets bénéfiques dans le traitement de l'information et l'établissement de comportements adaptés dans des tâches complexes investissant de l'information sociale.

En outre, nous pouvons envisager que les comportements d'hyperréactivité susmentionnés ont pu engendrer des TR plus courts en vitesse rapide. Le mouvement en profondeur est particulièrement crucial à détecter, notamment dans un environnement social pour les sujets TSA dans lequel l'approche traduirait un potentiel contact social et l'éloignement par l'évitement social. La présentation de mouvements en vitesse rapide pourrait générer des comportements d'hyperréactivité qui seraient particulièrement retrouvés lors d'utilisation de mouvements en profondeur pour lesquels les sujets TSA réagiraient de manière excessive. De plus, Gepner & Massion (2002) avaient également mis en évidence qu'en vitesse rapide (10°/sec vs. 30°/sec), les sujets TSA présentent des comportements de poursuite visuelle plus importants pour du mouvement translationnel, ce qui pourrait suggérer une sensibilité plus

importante pour du mouvement à vitesse rapide qui pourrait générer, lors d'utilisation de tâches de détection, des TR plus courts.

Au niveau intégratif, les sujets TSA ont présenté davantage de violations du modèle de la course en vitesse lente relativement aux groupes AQ+ et AQ-. Cela pourrait signifier que selon le traitement effectué sur les stimuli, l'effet de la vitesse ne serait pas équivalent. Plus concrètement, alors que la détection unisensorielle du mouvement implique le recrutement local des aires sensorielles corticales propres à chaque stimulus, visuel ou auditif, l'IMS nécessite des interactions entre les aires cérébrales. Si les capacités de détection du mouvement ne sont pas améliorées avec la présentation de vitesse lente dans le TSA, les processus intégratifs ont pu bénéficier quant à eux d'un ralentissement de la vitesse. Cela soutient l'intérêt des remédiations sensorielles basées sur le ralentissement d'informations multisensorielles sociales afin d'en améliorer leur intégration (Gepner & Féron, 2009).

Un spectre en commun ?

Tel que le suggère le modèle dimensionnel appliqué au TSA, nous nous attendions à retrouver le continuum autistique dans nos résultats. Néanmoins, les réponses des sujets TSA n'ont pas suivi la continuité des réponses des sujets non-TSA selon le groupe de personnalité autistique. En effet, les participants AQ+ ont manifesté des temps de réaction plus courts que les participants AQ- et TSA et ces derniers n'ont montré aucune différence dans les temps de réactions toutes conditions confondues. Nous pouvons nous interroger sur la notion de continuum autistique en soi. Certaines dimensions pourraient ne pas se manifester de façon linéaire tout au long du spectre et se caractériseraient par une rupture dans le continuum autistique lors de la transition entre le niveau subclinique (traits de personnalité) et le niveau clinique (TSA). Ce passage serait marqué par des difficultés exacerbées dans le TSA. Nous ne parlons plus de « trait » mais de symptômes pathologiques, qui altèrent significativement la qualité de vie et le quotidien des individus TSA. Cela pourrait être par exemple le cas de la sensibilité sensorielle qui augmenterait selon les traits de personnalité autistique, engendrant des temps de réaction plus courts mais lorsque cette sensibilité sensorielle est extrême (dans le TSA), elle générerait alors des difficultés prononcées de perception et en conséquence, des temps de réactions plus longs. La dimension motrice pourrait elle aussi être considérée. En effet, dans le TSA, des altérations du développement moteur (Teitelbaum et al., 1998), de la maladresse, de l'incoordination motrice, des perturbations du mouvement de saisie (Ghaziuddin & Butler, 1998; Mari et al., 2003; Ming et al., 2007; pour une revue, voir Miyahara et al., 1997) ont été fréquemment décrites. L'altération de la chaîne neuromusculaire du contrôle moteur

pourrait avoir rendu les participants TSA plus lents que le groupe AQ+. Notez que de telles particularités motrices dans le TSA affecteraient de la même manière chacune des conditions sensorielles, n'empêchant ainsi pas la présence d'une facilitation multisensorielle.

Il est également important de noter que la présente étude a utilisé un questionnaire en auto-évaluation pour évaluer les traits autistiques, qui en plus de ne pas rendre compte de toute la complexité du TSA, est sujet à des biais individuels. L'AQ ne présente pas de sensibilité et de spécificité en vue d'être un outil diagnostique, il se veut descriptif concernant les traits autistiques inspiré de descriptions théoriques du TSA. En ce sens, il évalue uniquement cinq domaines largement décrits comme étant altérés dans le TSA. Ces domaines relatifs aux compétences sociales, à l'attention aux détails, à la flexibilité attentionnelle et aux capacités d'imagination ne sont pas les seuls à caractériser le TSA qui se veut plus complexe, notamment par la présence de particularités sensorielles (APA, 2013). Cela signifie que les questionnaires auto-déclarés, tel que l'AQ, ne reflèteraient qu'une partie du fonctionnement du participant TSA.

Références

- APA. (2013). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders (DSM-5)*. American Psychiatric Association, Washington, DC.
- Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995). Controlling the False Discovery Rate : A Practical and Powerful Approach to Multiple Testing. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 57(1), 289-300. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1995.tb02031.x>
- Brandwein, A. B., Foxe, J. J., Butler, J. S., Russo, N. N., Altschuler, T. S., Gomes, H., & Molholm, S. (2013). The development of multisensory integration in high-functioning autism : High-density electrical mapping and psychophysical measures reveal impairments in the processing of audiovisual inputs. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, 23(6), 1329-1341. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhs109>
- Cappe, C., Thut, G., Romei, V., & Murray, M. M. (2009). Selective integration of auditory-visual looming cues by humans. *Neuropsychologia*, 47(4), 1045-1052. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2008.11.003>
- Cesaroni, L., & Garber, M. (1991). Exploring the experience of autism through firsthand accounts. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 21, 303-313. <https://doi.org/10.1007/BF02207327>
- Dawson, G., Meltzoff, A. N., Osterling, J., Rinaldi, J., & Brown, E. (1998). Children with autism fail to orient to naturally occurring social stimuli. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 28(6), 479-485. <https://doi.org/10.1023/a:1026043926488>
- Dawson, G., Toth, K., Abbott, R., Osterling, J., Munson, J., Estes, A., & Liaw, J. (2004). Early social attention impairments in autism : Social orienting, joint attention, and attention to distress. *Developmental Psychology*, 40(2), 271-283. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.40.2.271>
- Dwyer, P., Takarae, Y., Zadeh, I., Rivera, S. M., & Saron, C. D. (2022). Multisensory integration and interactions across vision, hearing, and somatosensation in autism spectrum development and typical development. *Neuropsychologia*, 175, 108340. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2022.108340>
- Feldman, J. I., Dunham, K., Cassidy, M., Wallace, M. T., Liu, Y., & Woynaroski, T. G. (2018). Audiovisual multisensory integration in individuals with autism spectrum disorder : A systematic review and meta-analysis. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 95, 220-234. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2018.09.020>
- Fujikawa-Brooks, S., Isenberg, A. L., Osann, K., Spence, M. A., & Gage, N. M. (2010). The effect of rate stress on the auditory brainstem response in autism : A preliminary report. *International Journal of Audiology*, 49(2), 129-140. <https://doi.org/10.3109/14992020903289790>
- Gepner, B., & Féron, F. (2009). Autism : A world changing too fast for a mis-wired brain? *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 33(8), 1227-1242. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.06.006>
- Gepner, B., & Massion. (2002). *L'autisme : Une pathologie du codage temporel ? (Vol. 21)*. Travaux Interdisciplinaires du Laboratoire Parole et Langage.
- Gervais, H., Belin, P., Boddaert, N., Leboyer, M., Coez, A., Sfaello, I., Barthélémy, C., Brunelle, F., Samson, Y., & Zilbovicius, M. (2004). Abnormal cortical voice processing in autism. *Nature Neuroscience*, 7(8), 801-802. <https://doi.org/10.1038/nn1291>
- Gessaroli, E., Santelli, E., Di Pellegrino, G., & Frassinetti, F. (2013). Personal Space Regulation in Childhood Autism Spectrum Disorders. *PLoS ONE*, 8(9), e74959. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0074959>
- Ghaziuddin, M., & Butler, E. (1998). Clumsiness in autism and Asperger syndrome : A further report. *Journal of Intellectual Disability Research: JIDR*, 42 (Pt 1), 43-48. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2788.1998.00065.x>
- Grandin, T., & Scariano, M. M. (1986). *Emergence : Labeled autistic*. Novato, CA: Arena Press.
- Green, D. M., & Swets, J. A. (1966). *Signal detection theory and psychophysics* (p. xi, 455). John Wiley.
- Haskins, A. J., Mentch, J., Botch, T. L., Garcia, B. D., Burrows, A. L., & Robertson, C. E. (2022). Reduced social attention in autism is magnified by perceptual load in naturalistic environments. *Autism Research*, 15(12), 2310-2323. <https://doi.org/10.1002/aur.2829>
- Källstrand, J., Olsson, O., Nehlstedt, S. F., Sköld, M. L., & Nielzén, S. (2010). Abnormal auditory forward masking pattern in the brainstem response of individuals with Asperger syndrome. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, 6, 289-296.

- Kuhl, P. K., Conboy, B. T., Padden, D., Nelson, T., & Pruitt, J. (2005). Early Speech Perception and Later Language Development : Implications for the « Critical Period ». *Language Learning and Development*, 1(3-4), 237-264. <https://doi.org/10.1080/15475441.2005.9671948>
- Lainé, F., Rauzy, S., Gepner, B., & Tardif, C. (2009). Prise en compte des difficultés de traitement des informations visuelles et auditives rapides dans le cadre de l'évaluation diagnostique de l'autisme. *Enfance*, 2009(01), 133. <https://doi.org/10.4074/S0013754509001153>
- Lainé, F., Tardif, C., & Gepner, B. (2008). Amélioration de la reconnaissance et de l'imitation d'expressions faciales chez des enfants autistes grâce à une présentation visuelle et sonore ralentie. *Annales Médico-psychologiques, revue psychiatrique*, 166(7), 533-538. <https://doi.org/10.1016/j.amp.2005.09.032>
- Lepistö, T., Kuitunen, A., Sussman, E., Saalasti, S., Jansson-Verkasalo, E., Nieminen-von Wendt, T., & Kujala, T. (2009). Auditory stream segregation in children with Asperger syndrome. *Biological Psychology*, 82(3), 301-307. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2009.09.004>
- Lord, C., Risi, S., Lambrecht, L., Cook, E. H., Leventhal, B. L., DiLavore, P. C., Pickles, A., & Rutter, M. (2000). The autism diagnostic observation schedule-generic : A standard measure of social and communication deficits associated with the spectrum of autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 30(3), 205-223.
- Lord, C., Rutter, M., DiLavore, P., & Risi, S. (2012). *Autism diagnostic observation schedule (3rd ed.)*. Torrance, CA: Western Psychological Services.
- Lord, C., Rutter, M., & Le Couteur, A. (1994). Autism Diagnostic Interview-Revised : A revised version of a diagnostic interview for caregivers of individuals with possible pervasive developmental disorders. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 24(5), 659-685. <https://doi.org/10.1007/BF02172145>
- Macmillan, N. A., & Creelman, C. D. (1991). *Detection Theory : A User's Guide*. Cambridge University Press, New York.
- 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. <https://doi.org/10.1098/rstb.2002.1205>
- Markram, K., & Markram, H. (2010). The Intense World Theory – A Unifying Theory of the Neurobiology of Autism. *Frontiers in Human Neuroscience*, 4. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2010.00224>
- Mayer, J. L. (2017). The Relationship Between Autistic Traits and Atypical Sensory Functioning in Neurotypical and ASD Adults : A Spectrum Approach. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 47(2), 316-327. <https://doi.org/10.1007/s10803-016-2948-5>
- Miller, J. (1982). Divided attention : Evidence for coactivation with redundant signals. *Cognitive Psychology*, 14(2), 247-279. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(82\)90010-x](https://doi.org/10.1016/0010-0285(82)90010-x)
- Ming, X., Brimacombe, M., & Wagner, G. C. (2007). Prevalence of motor impairment in autism spectrum disorders. *Brain and Development*, 29(9), 565-570. <https://doi.org/10.1016/j.braindev.2007.03.002>
- Miyahara, M., Tsujii, M., Hori, M., Nakanishi, K., Kageyama, H., & Sugiyama, T. (1997). Brief report : Motor incoordination in children with Asperger syndrome and learning disabilities. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 27(5), 595-603. <https://doi.org/10.1023/a:1025834211548>
- Mottron, L., & Burack, J. (Éds.). (2001). Enhanced Perceptual Functioning in the Development of Autism. In *The Development of Autism* (0 éd., p. 136-151). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781410600196-14>
- Mottron, L., Dawson, M., Soulières, 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. <https://doi.org/10.1007/s10803-005-0040-7>
- Poulain, R., Batty, M., & Cappe, C. (2023). What Makes the Detection of Movement Different within the Autistic Traits Spectrum ? Evidence from the Audiovisual Depth Paradigm. *Multisensory research*.

- Powers, A. R., Hillock, A. R., & Wallace, M. T. (2009). Perceptual Training Narrows the Temporal Window of Multisensory Binding. *The Journal of Neuroscience*, 29(39), 12265-12274. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3501-09.2009>
- Sasson, N. J., & Bottema-Beutel, K. (2022). Studies of autistic traits in the general population are not studies of autism. *Autism*, 26(4), 1007-1008. <https://doi.org/10.1177/13623613211058515>
- Schulz, S., & Stevenson, R. (2020). Distinguishing Sensory Sensitivity and Reactivity, and How They Relate to Autistic Traits. *PsyArXiv*. <https://doi.org/10.31234/osf.io/vhtfk>
- Stefanou, M. E., Dundon, N. M., Bestelmeyer, P. E. G., Ioannou, C., Bender, S., Biscaldi, M., Smyrnis, N., & Klein, C. (2020). Late attentional processes potentially compensate for early perceptual multisensory integration deficits in children with autism: Evidence from evoked potentials. *Scientific Reports*, 10(1), 16157. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73022-2>
- Stein, B. E., & Meredith, M. A. (1993). *The merging of the senses*. The MIT Press.
- Stevenson, R. A., Wilson, M. M., Powers, A. R., & Wallace, M. T. (2013). The effects of visual training on multisensory temporal processing. *Experimental brain research. Experimentelle Hirnforschung. Experimentation cerebrale*, 225(4), 479-489. <https://doi.org/10.1007/s00221-012-3387-y>
- Takayama, Y., Hashimoto, R., Tani, M., Kanai, C., Yamada, T., Watanabe, H., Ono, T., Kato, N., & Iwanami, A. (2014). Standardization of the Japanese version of the Glasgow Sensory Questionnaire (GSQ). *Research in Autism Spectrum Disorders*, 8(4), 347-353. <https://doi.org/10.1016/j.rasd.2013.12.017>
- Tardif, C., Lainé, F., Rodriguez, M., & Gepner, B. (2007). Slowing Down Presentation of Facial Movements and Vocal Sounds Enhances Facial Expression Recognition and Induces Facial–Vocal Imitation in Children with Autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 37(8), 1469-1484. <https://doi.org/10.1007/s10803-006-0223-x>
- Tardif, C., Thomas, K., & Gepner, B. (2002). Contribution à l'évaluation du système phonologique explicite chez des enfants autistes. *Revue parole*, 21, 35-72.
- Teder-Sälejärvi, W. A., Pierce, K. L., Courchesne, E., & Hillyard, S. A. (2005). Auditory spatial localization and attention deficits in autistic adults. *Cognitive Brain Research*, 23(2), 221-234. <https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2004.10.021>
- Teitelbaum, P., Teitelbaum, O., Nye, J., Fryman, J., & Maurer, R. G. (1998). Movement analysis in infancy may be useful for early diagnosis of autism. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 95(23), 13982-13987. <https://doi.org/10.1073/pnas.95.23.13982>
- Ujiie, Y., Asai, T., & Wakabayashi, A. (2015). The relationship between level of autistic traits and local bias in the context of the McGurk effect. *Frontiers in Psychology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00891>
- Ujiie, Y., & Takahashi, K. (2021). Weaker McGurk Effect for Rubin's Vase-Type Speech in People With High Autistic Traits. *Multisensory Research*, 34(6), 663-679. <https://doi.org/10.1163/22134808-bja10047>
- Wechsler, D. (2008). *Wechsler Adult Intelligence Scale–Fourth Edition (WAIS-IV)*.

2.2 Etude neurophysiologique

2.2.1 Etude 3

Does it move? The Multisensory Integration of Depth Movements in the Autistic Personality: Insights from Neural Correlates

Cette étude est en cours de rédaction.

Does it move? The Multisensory Integration of Depth Movements in the Autistic Personality:
Insights from Neural Correlates

Author names and affiliations

Rachel Poulain^{1,2}, Magali Batty¹, Céline Cappe²

¹Centre d'études et de recherches en psychopathologie et psychologie de la santé – EA7411 –
Université Toulouse 2, France

²Centre de Recherche Cerveau et Cognition – UMR 5549 CNRS – Université Toulouse 3 Paul
Sabatier, France

Corresponding author

Céline Cappe

CNRS, Centre de Recherche Cerveau et Cognition, UMR 5549

Pavillon Baudot, CHU Purpan

BP 25202 – 31052 TOULOUSE CEDEX

Celine.cappe@cnrs.fr

+33 5 62 74 61 37

Abstract

Atypical sensory processing is recently recognized as a defining characteristic of Autism Spectrum Disorder (ASD). While the integration of multisensory information has implications for developing higher-level skills like socio-communicative functioning, there remains a significant gap in understanding how individuals in the autistic spectrum integrate multiple sensory inputs. Multisensory dynamic information is a more ecologically valid construct than static stimuli, especially depth movement, which provides essential social (approach for interaction) and non-social (avoidance of threats/collisions) information. As autistic traits are distributed across a spectrum encompassing clinical and general populations, our study investigated the multisensory integration of depth cues according to the autistic personality of non-ASD individuals. By completing a go/no-go detection task, multisensory integration (MSI) was analyzed by applying the additive model, a specific model testing for integrative interactions from neurophysiological data. The unisensory processing was investigated using low-level sensory-specific ERPs in the visual domain (P1, N1) and the auditory domain (Ta, Ta, N1b). Our findings revealed intergroup differences at early stages of integration (from 50 ms), suggesting more multisensory integration in sensory areas and less extensive MSI in the frontocentral areas among individuals with high autistic traits. In addition, intergroup differences were found at the level of visual and auditory ERPs reflecting early stages of information processing. These results provide evidence of sensory particularities in individuals with high autistic traits and suggest that low-level stages of multisensory integration and unisensory processing may operate differently throughout the autistic spectrum.

1. Introduction

Autism Spectrum Disorder (ASD) is characterized by impairment of socio-communication skills and by repetitive patterns of stereotyped behaviors (APA, 2013). In addition, sensory abnormalities have been described across all sensory domains (Marco et al., 2011) and constitute since 2013, a part of the diagnostic criteria (APA, 2013). Difficulties in sensory behavioral responses may persist throughout adulthood, affecting consequently many areas of a person's daily life (Crane et al., 2009; Leekam et al., 2007; Tomchek & Dunn, 2007). While ASD is a clinical diagnosis, many individuals in the general population may exhibit, albeit at lower levels than in individuals with ASD, autistic personality traits without meeting the full diagnostic criteria for ASD. Several similarities were demonstrated between ASD and the high autistic personality, such as cognitive processing (e.g., Grinter et al., 2009), sensory processing in several modalities (e.g., Mayer, 2017; Takayama et al., 2014), multisensory integration (e.g., van Laarhoven et al., 2019) and impaired responses to social information (e.g., Voos et al., 2013). Moreover, recent studies reported similar neurobiological, neuroanatomical, and neurofunctional issues between subjects with ASD and those without ASD but with high autistic traits (Alemany et al., 2021; Kondo & Lin, 2020; von dem Hagen et al., 2013).

One aspect of sensory processing involves the combination of information from different modalities, such as visual and auditory inputs. The combination of visual and auditory information, also known as multisensory integration (MSI), plays a significant role in social situations where the perception of emotions and language is important. Given that difficulties with language and non-verbal social cues are often a source of difficulties for ASD persons, investigations of multisensory integration have received a great deal of attention. Most studies on ASD used audiovisual stimuli to investigate speech perception and emotion processing and showed difficulties in merging sensory information from different senses (for a review, Feldman et al., 2018). However, it needs to be clarified to what extent the results of these tasks reflect perceptual aspects of (dysfunctional) multisensory integration or rather reflect higher-order social impairment. Furthermore, the interest in using simple and non-social stimuli is reinforced by recent theories proposing that some social interaction and communication deficits observed in ASD may be linked to lower-level particularities in sensory processing (Robertson & Baron-Cohen, 2017; Thye et al., 2018). In this line, an increasing number of studies using electro-encephalography (EEG) revealed differences in sensory-specific event-related potentials (ERPs) in ASD when processing auditory or visual information. Reduced amplitudes of the temporal T_b responses have been reported in ASD in studies using simple non-social

auditory stimuli (for a review, Williams et al., 2021). In addition, reduced auditory P1 amplitude in ASD was highlighted in studies using simple non-social click sounds (Buchwald et al., 1992; Donkers et al., 2015), complex environmental sounds (Bidet-Caulet et al., 2017) and complex voice sound (Ceponiene, Lepistö, Alku, et al., 2003; Ceponiene, Lepistö, Shestakova, et al., 2003; for a review, Rotschafer, 2021). In addition, a higher amplitude of the N1 has been proposed when a visual simple non-social stimulus is presented (Sokhadze et al., 2017). Prior studies also reported that the amplitude of the visual P1 is attenuated in ASD when using simple non-social stimuli (Kovarski et al., 2019; Maekawa et al., 2011), which Kovarski et al. (2019) suggested could reflect elevated single-trial latency variability. When exploring multisensory integration with EEG, the additive model is currently used (Barth et al., 1995) and proposes that when the response to a multisensory stimulus is different from the sum of the responses to each unisensory stimulus, it could indicate the presence of multisensory interactions. This implies that the brain is not simply adding up the individual unisensory responses, but is instead integrating information across modalities. By using high-temporal-resolution ERPs, it is possible to investigate these multisensory interactions at various stages of processing, which provides more comprehensive insights than relying solely on the distribution of reaction times. A few studies exploring neural correlates of multisensory integration with such an additive model were developed in ASD and used simple non-social stimuli. Based on these studies, ASD participants exhibited reduced neural multisensory interactions as early as ~90 ms post-stimulus onset and a higher recruitment of temporal and occipital sensory areas to integrate the multisensory information (Brandwein et al., 2013; Molholm et al., 2020; Russo et al., 2010; Stefanou et al., 2020). Furthermore, Brandwein et al. (2015) demonstrated that MSI level could predict ASD severity, reinforcing that investigating early sensory responses might provide crucial information to understand higher-level particularities.

While previous studies have mainly focused on exploring static sensory stimuli, the sensory inputs we experience during our daily activities are predominantly dynamic. A more ecological approach would involve investigating multisensory moving information. Depth movement is a vital cue that helps individuals determine whether an object is moving away (receding) or approaching (looming), allowing them to decide whether to confront or avoid it for safety reasons. Since looming cues can be a potentially dangerous signal, previous research highlighted unsurprisingly preferential responsiveness to looming signals (e.g., Maier et al., 2008; Neuhoff, 1998, 2001). In addition, Cappe et al. (2012) showed specific integration of multisensory looming signals underpinned by early multisensory interactions after the stimulus onset. Such specific neural integration of looming signals leads to enhanced behavioral

responses (Cappe et al., 2009), such phenomenon more largely referred as multisensory facilitation in the MSI domain (Stein, 2012; Stein & Meredith, 1993). Depth movement is also essential in social interactions, where individuals may approach or distance themselves from others, making it particularly interesting in ASD, where social functioning is one of the main areas of difficulty. Many studies have explored the abilities of ASD subjects to recognize human actions from points of light ("biological movement"; Johansson, 1973). ASD subjects manifest difficulties in recognizing biological movements and extracting social information from them (for a review, see Todorova et al., 2019). Such difficulties would be sustained by less extensive and weaker cerebral activity, mainly observed in the parietotemporal and frontal areas, in the basal ganglia, and in the thalamus (Freitag et al., 2008). Electrophysiological studies focused on late ERPs, reflecting higher-order processes than sensory processing, showed a lateralization deficit and lower amplitude values in ASD (Kröger et al., 2014 ; Hirai et al., 2014). Centelles et al. (2013) studied the recognition abilities of a "social movement" which involves interaction with other individuals (e.g. playing football), to a "non-social movement" which constituted any human movement without social interaction (e.g., walking, stepping forward or backward). Results showed that ASD subjects are less successful at categorizing both types of movement and exhibited a slower response speed for social movement. It therefore seems that there are difficulties for ASD subjects perceiving movement that transmits social information, either directly (movement involving social interaction) or indirectly (movement involving at least one person). Only two studies focused on depth movement in ASD. Hu et al. (2017) used looming complex visual stimuli and found a lack of behavioral reactivity to aversive looming signals in ASD participants associated with abnormality (weak connectivity) in a neuronal pathway involved in looming-evoked defensive responses (superior colliculus – pulvinar – amygdala). More recently, we found over-responsiveness of participants with a high autistic personality to stimuli in depth movement (Poulain et al., 2023). Moreover, we found that subjects with high autistic traits exhibited faster reaction times to audiovisual cues, particularly when the audiovisual stimuli were looming. These results provided evidence of sensory particularities in people with high autistic traits and suggested that low-level stages of multisensory integration could operate differently all along the autistic personality spectrum. Difficulties in processing depth-moving signals may have implications for individuals in a variety of contexts, such as navigating through the environment, participating in team sports or activities, and engaging in social communication and interaction. In the present study, we aimed to characterize the neural correlates of depth movement according to the level of autistic personality traits.

2. Method

2.1 Participants

Forty-two young adults (17 males) between the ages of 18–26 years participated in this study. Of these 42 participants, three were excluded for having insufficient behavioral correct responses (see section 2.4.2.1), and two for having insufficient trials number after EEG preprocessing (see section 2.4.3), leaving 37 participants (16 males) with a mean age of 23.32 (SD = 2.93). All participants had normal hearing and normal or corrected-to-normal vision and had no history of neurological or psychiatric illness. According to a standardized handedness questionnaire (Oldfield, 1971), the majority ($n = 36$) were right-handed. The study conformed with the Code of Ethics of the World Medical Associations (Declaration of Helsinki) and was approved by the local research ethics committee (Comité de Protection des Personnes Sud Méditerranée III, Avis N° 2020-A03056-33). All participants provided written informed consent and received monetary compensation. Participants took part in a single two-hour session. Within the session, a questionnaire was administered to evaluate the participants' autistic traits. Subsequently, the participants underwent a computerized behavioral task while EEG was recorded.

2.2. Autistic profile

The Autism-Spectrum Quotient (AQ) is a self-report questionnaire consisting of 50 items, largely used in the literature to assess the degree of autistic traits in adults (Baron-Cohen et al., 2001). A higher score indicates a greater level of autistic behavior. Participants completed the French version of the AQ (Kempnaers et al., 2017). AQ score was used to explore the relationship between autistic traits and behavioral as well as neurophysiological responses to the stimuli. To do so, we split our sample into two groups according to the median score of the AQ (19 ± 6.65), resulting in a high AQ group (AQ+, $n = 18$, male = 10, mean = 24.28 ± 3.16) and a low AQ group (AQ-, $n = 19$, male = 6, mean = 13.62 ± 3.45).

2.3 Behavioral experiment

Stimuli and the experimental task came from the study by Cappe et al. (2009) prior research, which included auditory, visual and audiovisual stimuli that could be dynamic or static. The dynamic perception was induced by changing in volume for auditory stimuli and in size for visual stimuli. During the audiovisual condition, the auditory and visual stimuli were presented simultaneously and were always congruent (either looming, receding or static). In static conditions, the size and volume of the stimuli remained constant. All stimuli lasted 500 ms.

The visual stimuli, presented in the center of the screen at a viewing distance of ~80 cm, were circular discs that appeared either white on a black background or black on a white background and were presented randomly across blocks of trials, with a contrast of 50%. The size of the stimuli varied symmetrically, expanding from 7° to 13° in diameter for the looming condition, and contracting from 7° to 1° in diameter for the receding condition (see Fig. 27A). The auditory stimuli were delivered through insert earphones to create a binaural effect. These stimuli were 1000 Hz tones made up of a triangular waveform. To avoid any clicking noises, 10 ms onset and offset ramps were added to the auditory stimuli, which were sampled at a rate of 44.1 kHz. The intensity of the tones changed linearly by approximately 10 dB over 500 ms in either an increasing (looming condition) or decreasing (receding condition) pattern (see Fig.27B).

The participants took part in a go/no-go detection of moving versus static stimuli that could be auditory, visual, or multisensory audiovisual (A, V, and AV, respectively). There were 9 configurations of stimuli in total (6 unisensory and 3 multisensory conditions). Go trials (i.e., those that contained moving stimuli) occurred on 80% of the trials. Each of the 9 conditions was repeated 104 times across 13 blocks of randomly intermixed trials. After a randomized cross-fixation time of 800-1400 ms, the stimulus was presented for 500 ms. A period of 1000 ms of additional response time followed the stimulus presentation. The participants' responses were recorded during the stimulus presentation and the additional response time.

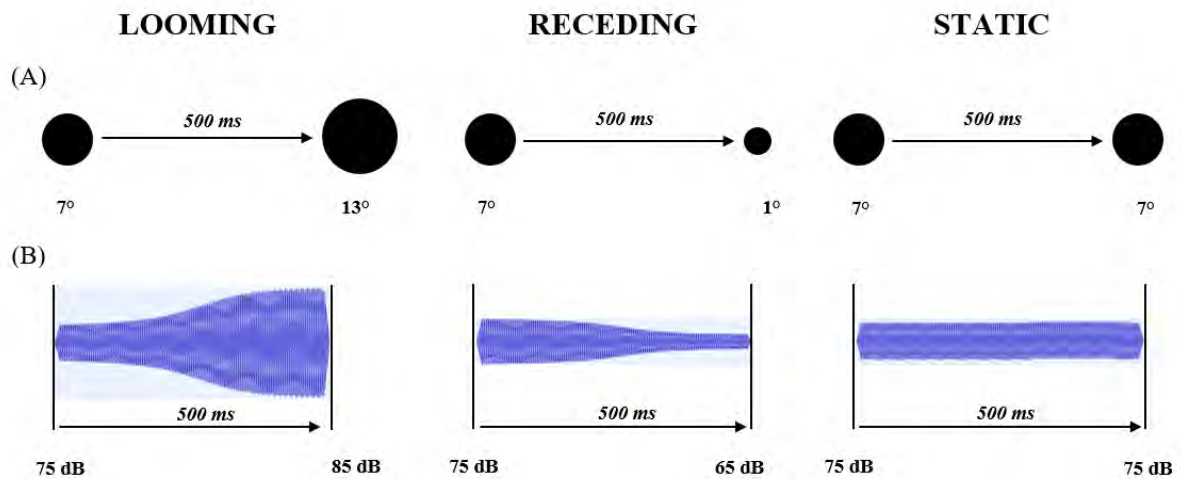


Figure 27. The visual, auditory and audiovisual experimental stimuli. (A) In the visual modality, stimuli were presented symmetrically expanding (looming) or contracting (receding) over the duration of 500 ms. (B) In the auditory modality, movement perception was induced by complex tones with rising-intensity (looming) or falling-intensity (receding) during 500 ms. During the audiovisual condition, the auditory and visual stimuli were presented simultaneously and were always congruent

2.4 Data Acquisition and Statistical Analysis

2.4.1 Behavioral analysis

2.4.1.1 Accuracy and Reaction Times Analysis

Responses with reaction times occurring earlier than 150 ms after the onset of the stimulus were considered as anticipated, while those occurring later than 1000 ms were deemed missed. Hence, only responses with reaction times between 150 ms and 1000 ms were taken into account for the analysis. Participants presented at least 30 responses per go condition. In total, the mean and the standard deviation of trial numbers per condition included in the RT analysis were 90.5 (± 16.36). The accuracy analysis was based on 92.89 trials (± 14.42) per condition.

Accuracy and reaction times for go conditions were analyzed using ANOVA based on generalized linear mixed-effects models (GLMM), using a binomial (correct/incorrect) and a gamma law respectively. Such model tested the effects and the interaction of the modality (A: auditory vs. V: visual vs. AV: audiovisual), the movement (L: looming vs. R: receding), and the AQ group (AQ+ vs. AQ-). ANOVA were computed using Wald Chi-squared tests and post-hoc tests were subsequently conducted using Wilcoxon rank tests with a False Discovery Rate correction (Benjamini & Hochberg, 1995). Results were considered significant at $p < .05$.

2.4.1.2 Testing the Race Model

Reaction times (RT) can be used to quantify multisensory integration (MSI). However, it should be noted that the RT to multisensory stimuli may be faster due to the presence of two independent and redundant unisensory signals, which might occasionally enable one of these signals to be processed more quickly by chance ("Miller inequality", Miller, 1982). The race model inequality can be employed to determine if RT facilitation is greater than anticipated from the redundant signals scenario (Miller, 1982). The model is tested as follows: For any latency t , predicted cumulative probability (CP) values of multisensory stimuli (TR_{AV}) are calculated by summing the CP of each unisensory stimulus (TR_A and TR_V) from which the expression of their joint probabilities is subtracted:

$$\text{Predicted CP } (TR_{AV} \leq t) = \text{CP } (TR_A \leq t) + \text{CP } (TR_V \leq t) - \text{CP } (TR_A \leq t) * \text{CP } (TR_V \leq t).$$

Miller Inequality values are calculated by subtracting the value predicted by the race model from the CP of the participants' RT to the AV stimulus. Positive values represent the violation of the race model and suggest that sensory inputs interacted during processing to facilitate RT.

2.4.2 *Electroencephalography Acquisition*

Scalp-EEG signals were acquired with 64 Ag/AgCl active pin channels at 512 Hz (Biosemi Active Two 10/20 system). The continuous EEG was recorded referenced to a common mode sense (CMS) active channel and driven right leg (DRL) passive channel. Data were preprocessed with EEGLab (Delorme & Makeig, 2004) working in the Matlab environment (The Mathworks R). EEG data was re-referenced to an average of all channels, high-pass filtered at 0.5 and low-pass filtered at 60 Hz. The continuous EEG data were visually inspected to identify non-stereotypical artifacts. Segments with non-stereotypical EEG artifacts were removed from the EEG data. The re-referenced, filtered and visually cleaned EEG data were submitted to an Independent Component Analysis (Infomax ICA; Bell & Sejnowski, 1995) to identify neural components contributing to the observed scalp data. Using the ICLABEL classifier (Pion-Tonachini et al., 2019), the components associated with an above .95 probability to be artifactual were removed from the EEG data structure, thus removing their contributions to the observed EEG. Rejection was systematically checked by visual inspection of component properties (time series, spectra, topography) according to ICLABEL guidelines, leading to an average number of 7 components (IC) rejected by participant (min = 3 IC, max = 19 IC). Channels with excessive noise were interpolated on a trial-by-trial basis using the nearest neighbor spline (Perrin et al., 1987, 1989). EEG data were then epoched relative to the onsets of stimuli (-100 to 500 ms). After epoching, the recording was again visually inspected for non-stereotypical artifacts (such as muscle activation or intermittent channel artifacts) and any epoch found to contain an artifact was removed from the data. Trials that did not meet criteria for inclusion in the behavioral analyses (described above) were also excluded from the ERPs analysis. Participants presented at least 30 trials number per condition. Finally, the average number of trials per condition included in the analysis was 83 ± 15 (min = 35, max = 101).

2.4.3 *Electrophysiological Analysis*

2.4.3.1 *Unisensory ERPs Analysis*

The grand averaged ERPs across the full dataset for a given stimulus condition (global visual or global auditory) were used to identify both spatially and temporally the ERPs peaks (see Table 8). This allowed us to identify ERPs classically found in the literature regarding early visual (P1 and N1) and auditory (Ta, Tb and N1b) processing stages (Luck, 2014). For each ERP, peak latencies were measured and mean amplitudes over a time-window centered on the peak were extracted.

EEG indices of early visual processing were based on the mean amplitudes and the peak latencies of P1 (104-134 ms time-window, PO3, PO4, O1, O2, POz, Iz, Oz) and N1 (164-194 ms time-window, P3, P4, P5, P6, P7, P8, PO3, PO4, PO7, PO8). At the auditory level, Ta (149-179 ms time-window), and Tb (204-234 ms time-window) were analyzed from temporal channels (FT7, FT8, T7, T8, TP7, and TP8), and N1b (149-179 ms time-window) from frontocentral channels (FC3, FC1, FC4, FC2, Fz, FCz). We also analyzed an auditory ERP specialized in movement processing recently highlighted by Campus et al. (2017) at the parieto-occipital channels (PO3, PO4, O2, O1, POz, Iz, Oz) in the 160-205 ms time-window. Such “crossmodal” ERP has been interpreted as an early occipital processing of sound linked to the construction of an auditory spatial map that may utilize the visual map of the occipital cortex (Campus et al., 2017).

Mean amplitude values were entered into separate ANOVA based on linear model (LM) testing the effects and the interaction of the movement (L: looming vs. R: receding), the AQ group (AQ+ vs. AQ-), and the region (Left: LH vs. Right: RH vs. Central: C). Similar ANOVA were applied for peak latency values. ANOVA were computed using Wald Chi-squared tests and post-hoc tests were subsequently conducted using Tukey HSD tests with a False Discovery Rate correction (Benjamini & Hochberg, 1995). Results were considered significant at $p < .05$.

Table 8. Unisensory ERPs analyzed. Channels of interest for each component and peak latency measured on the grand average.

Sensory ERPs	Peak latency (ms)	Channels
Visual P1	119	LH : PO3, O1 RH : PO4, O2 Central : POz, Iz, Oz
Visual N1	179	LH : P3, P5, P7, PO3, PO7 RH : P4, P6, P8, PO4, PO8
Auditory Ta	164	LH : FT7, T7, TP7 RH : FT8, T8, TP8
Auditory Tb	219	LH : FT7, T7, TP7 RH : FT8, T8, TP8
Auditory N1b	164	LH : FC3, FC1 RH : FC4, FC2 Central : Fz, FCz
Crossmodal ERP	185	LH : PO3, O1, RH : PO4, O2, Central : POz, Iz, Oz

2.4.3.2 Neural Measures of MSI

2.4.4.2.1 Multisensory ERPs Analysis

Multisensory integration in ERPs was assessed with the additive model (Barth et al., 1995) by comparing the response to the audiovisual condition (AV) to the sum of the responses to the respective unisensory conditions (SUM). Multisensory responses greater (i.e., positive difference wave values) or less (i.e., negative difference wave values) than the sum of the unisensory conditions are termed nonlinear responses and constitute multisensory integration indexes. However, this assumption is only valid during sensory processing stages and not during premotor or motor activity (< 250 ms; Stevenson et al., 2014), since these processes will be represented twice in the summed response.

Statistical Cluster Plots (SCP) were computed by plotting the results of running t-tests comparing the global AV and SUM (global A + global V) ERPs at each time point (from 50 to 250 ms), for each channel. The probability of Type-1 errors was decreased by only considering those data points that reached significance (at the $p < .05$ level) for at least 12 subsequent consecutive time points (Guthrie & Buchwald, 1991). In addition, a spatial correction was applied by considering significant effects on at least five channels within a site (frontal, frontocentral, central, and parieto-occipital). P-values were additionally adjusted using a False Discovery Rate correction (Benjamini & Hochberg, 1995). Such SCP allowed characterizing time-window and channels manifesting multisensory integration to test further the effect/interactions of the Movement, the Group and the Region. In total, seven spatiotemporal windows were identified based on significant differences between AV and the unisensory summed responses. For each of those spatiotemporal windows, mean amplitude values were measured in the individual subject data. Such mean amplitude values were entered into separate ANOVA based on linear model (LM) testing the effects and the interaction of the modality (AV: audiovisual vs. SUM: auditory+visual), the movement (L: looming vs. R: receding), the AQ group (AQ+ vs. AQ-), and the region (Right Hemisphere: RH vs. Left Hemisphere: LH vs. Central channels: C). ANOVA were computed using Wald Chi-squared tests and post-hoc tests were subsequently conducted using Tukey HSD tests with a False Discovery Rate correction (Benjamini & Hochberg, 1995). Results were considered significant at $p < .05$.

2.4.4.2.1 Topographical Analysis

To identify statistically periods of topographic modulation, we quantified the global dissimilarity (DISS; Lehmann & Skrandies, 1980; Murray et al., 2008) between pair and sum ERPs as a function of time relative to stimulus onset. DISS is calculated as the root mean square of the difference between two strength-normalized vectors (here the voltage potential values across the channel montage). The DISS value at each time point was then compared between groups using bootstrapping tests from 50 to 250 ms, which has been colloquially referred to as TANOVA (Murray et al., 2008). The neurophysiologic utility of this analysis is that topographic changes indicate differences in the configuration of the brain's underlying active generators (Lehmann et al., 1987). This method is independent of the reference channel and is insensitive to pure amplitude modulations across groups. As above, only effects where p values were $< .05$ for at least 12 (Guthrie & Buchwald, 1991) contiguous time points were considered reliable. TANOVA between groups was first computed for global responses (any types of movement), then for the looming and receding conditions.

3. Results

3.1 Behavioral results

3.1.1 Accuracy and Reaction Times

The mean performance reached 89% in the go conditions (SEM = .007%) and 94% in the no go conditions (SEM = .03%).

ANOVA on the accuracy showed Modality effect ($\chi^2(2) = 755.62, p < .0001$), participants demonstrating higher accuracy in the audiovisual condition compared to all others conditions ($Z > 2.78, p < .0001$) and lower one in the auditory condition in comparison to all others conditions ($Z > -31.58, p < .0001$). An interaction Modality x Group ($\chi^2(2) = 41.81, p < .0001$) revealed lower accuracy of the AQ+ group in the auditory condition compared to all others conditions ($Z > -3.56, p < .01$). A Movement effect ($\chi^2(1) = 458.89, p < .0001$) indicated higher accuracy in the looming condition, that was particularly the case for the AQ- group compared to AQ+ group, whatever the condition ($Z > -4.9, p < .05$) according to an interaction Movement x Group ($\chi^2(1) = 41.35, p < .0001$). An interaction Modality x Movement ($\chi^2(1) = 679.53, p < .0001$) demonstrated lower accuracy in the auditory receding condition compared to all others conditions ($Z > -10.63, p < .01$). In addition, AQ- presented higher accuracy in the looming auditory condition compared to AQ+ group, whatever the condition ($Z > 26.4, p < .01$) as demonstrated by an interaction Modality x Movement x Group ($\chi^2(2) = 22.43, p < .0001$). No Group effect was found ($p > .72$, see Fig.28A).

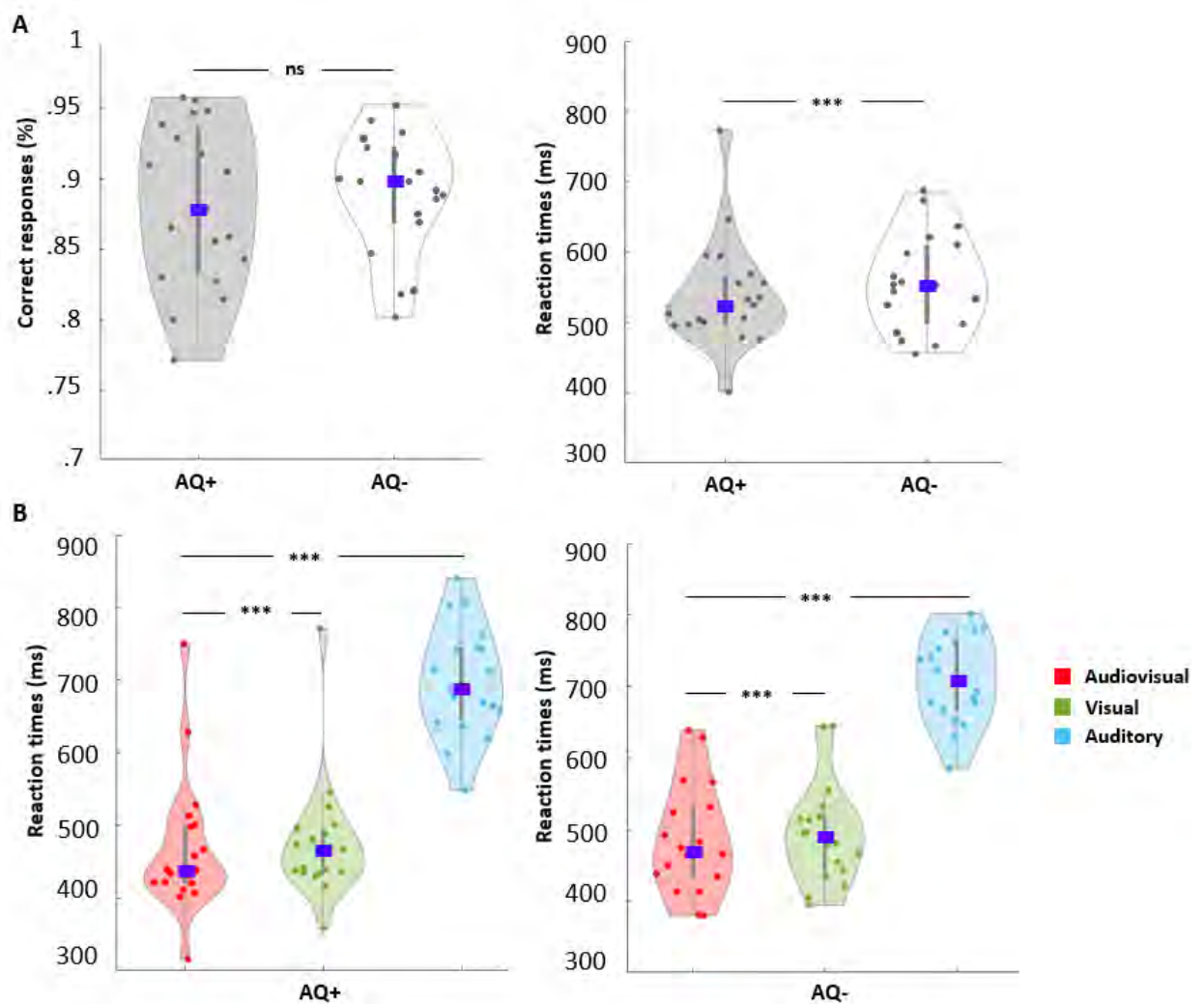


Figure 28. Behavioral responses across AQ groups and sensory modalities. To represent the results of the binomial GLMM (1 = correct response; 0 = incorrect response), binary values of the model were transformed into a rate of correct responses. (A) Mean of RT (left) and mean of transformed binary values (right) for the high and low AQ group. (B) Mean of RT for the high AQ group (left) and the low AQ group (right) across the sensory modalities (audiovisual, visual, and auditory respectively). In each plot, the median, the interquartile range, and the density are represented. *** $p < .0001$; * $p < .05$.

ANOVA on RT revealed a Group effect ($\chi^2(1) = 100.15, p < .0001$), AQ+ manifesting shorter RT (see Fig 2A). Multisensory facilitation was found, RT in the audiovisual condition being shorter ($Z > -46.21, p < .01$) as demonstrated by a Modality effect ($\chi^2(2) = 33588, p < .0001$). Such multisensory facilitation was found in each AQ group ($Z > -23.54, p < .0001$, see Fig. 28B) but note that AQ+ demonstrated particularly shorter RT in the audiovisual condition compared to AQ- ($Z > -5.4, p < .001$), as revealed by an interaction Modality x Group ($\chi^2(2) = 178.34, p < .0001$). A Movement effect ($\chi^2(1) = 681.78, p < .0001$) indicated shorter RT in the looming condition compared to the receding condition and an interaction Modality x Movement ($\chi^2(2) = 2531.75, p < .0001$) highlighted that RT were shorter when an audiovisual looming stimuli were presented compared to unisensory looming, receding and multisensory receding conditions ($Z > -5.4, p < .001$). In addition, longer RT was found in the auditory receding condition in comparison to all others conditions ($Z > 35.2, p < .0001$). It has to be cleared that multisensory facilitation was found in each movement condition (Looming: $Z > 5.4, p < .001, p < .0001$; Receding: $Z > 2.8, p < .05$) but the interaction Modality x Movement x Group ($\chi^2(2) = 32.86, p < .0001$) revealed that only AQ+ demonstrated multisensory facilitation in the receding condition ($Z > -3.1, p < .05$). No Group x Movement interaction was found ($p > .67$).

3.1.2 Race Model

A race-model analysis was applied to the RT of all participants to determine whether shorter RT in the multisensory condition exceeded the values predicted by the statistical summation of the fastest unisensory responses (see section 2.4.2.2). No significant intergroup differences were found, with both AQ groups showing similar race model violations from the first to the 15th percentile in looming and receding conditions ($p < .05$).

3.2 Electrophysiological results

3.2.1 Unisensory ERPs

Because no significant results were found for latencies ($p > .06$), we focused on mean amplitude results.

Visual P1. As indicated by a Movement effect ($\chi^2(1) = 5.57, p < .05$; Fig. 29A), mean amplitude values were higher in the receding condition in comparison to the looming condition. No group effect or interaction were found ($p > .2$).

Visual N1. The visual N1 manifested a Movement effect ($\chi^2(1) = 3.93, p < .05$; Fig. 29B). Participants manifested higher mean amplitude values in the looming condition compared to the receding condition. No group effect or interaction were found ($p > .19$).

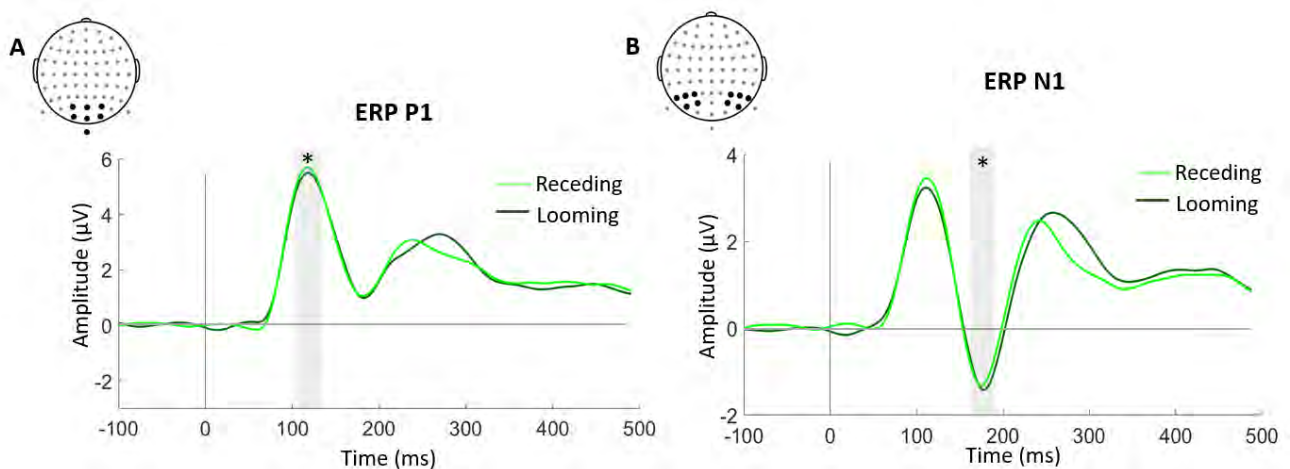


Figure 29. Visual ERPs. (A) ERP P1 waveform over parieto-occipital channels with 104-134 ms time-window. (B) ERP N1 waveform over parieto-occipital channels with a time-window of 164-194 ms. Time-windows in which mean amplitude values were analyzed, are represented in grey. * $p < .05$.

Auditory Ta. A significant Group effect ($\chi^2(1) = 5.36, p < .03$) indicated that AQ+ presented higher amplitude mean values than AQ- (Fig. 30A). No main effects or interactions were found for Tb ($p > .09$, Fig. 30A).

Auditory N1b. A significant interaction Group x Movement ($\chi^2(1) = 13.24, p < .0001$) revealed that AQ- presented higher amplitude mean values in the receding condition compared to the AQ+ group ($p < .05$, Fig. 30B).

Crossmodal ERP. As indicated by a significant interaction Group x Movement ($\chi^2(1) = 10.86, p < .0001$), only AQ- presented higher amplitude mean values in the receding condition compared to the looming condition ($p < .01$, Fig. 30C).

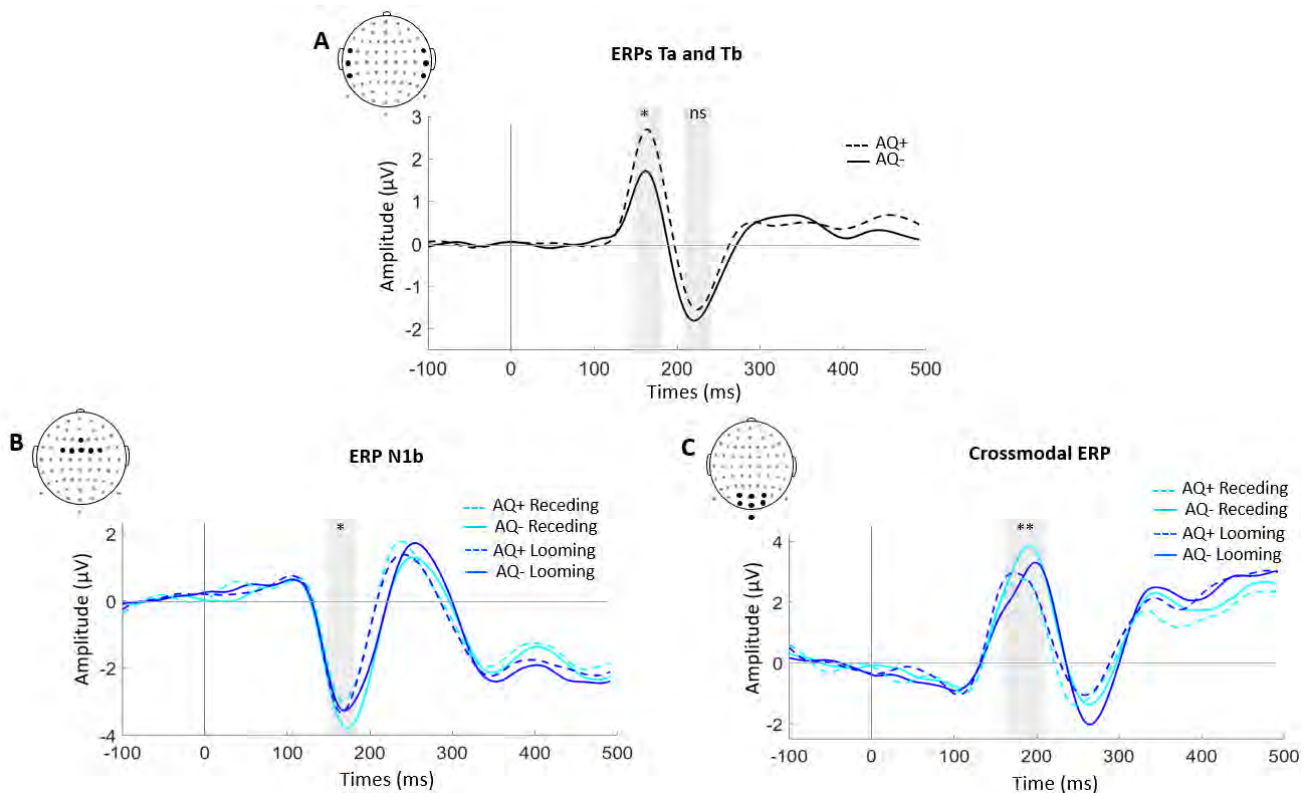


Figure 30. Auditory ERPs. (A) ERPs Ta and Tb waveforms over temporal channels with 149-179 ms time-window and 204-234 ms time-window, respectively. (B) ERP N1b waveform over frontal channels with a time-window of 149-179 ms. (C) Crossmodal ERP computed over parieto-occipital channels in the time-window of 160-205 ms. Time-windows in which mean amplitude values were analyzed, are represented in grey. ** $p < .01$; * $p < .05$; ^{ns}non-significant.

3.2.2 Multisensory ERPs

Based on SCP analysis, AV interactions, as indicated by differences between the multisensory and the summed ERP, were readily observable from 50 ms to 250 ms across different channels and time-windows (see Fig. 31). Seven spatiotemporal windows were defined and analyzed by computing ANOVA (see Table 9). Because AV interactions appeared in similar time-windows in frontocentral and central sites, channels from those sites were analyzed together.

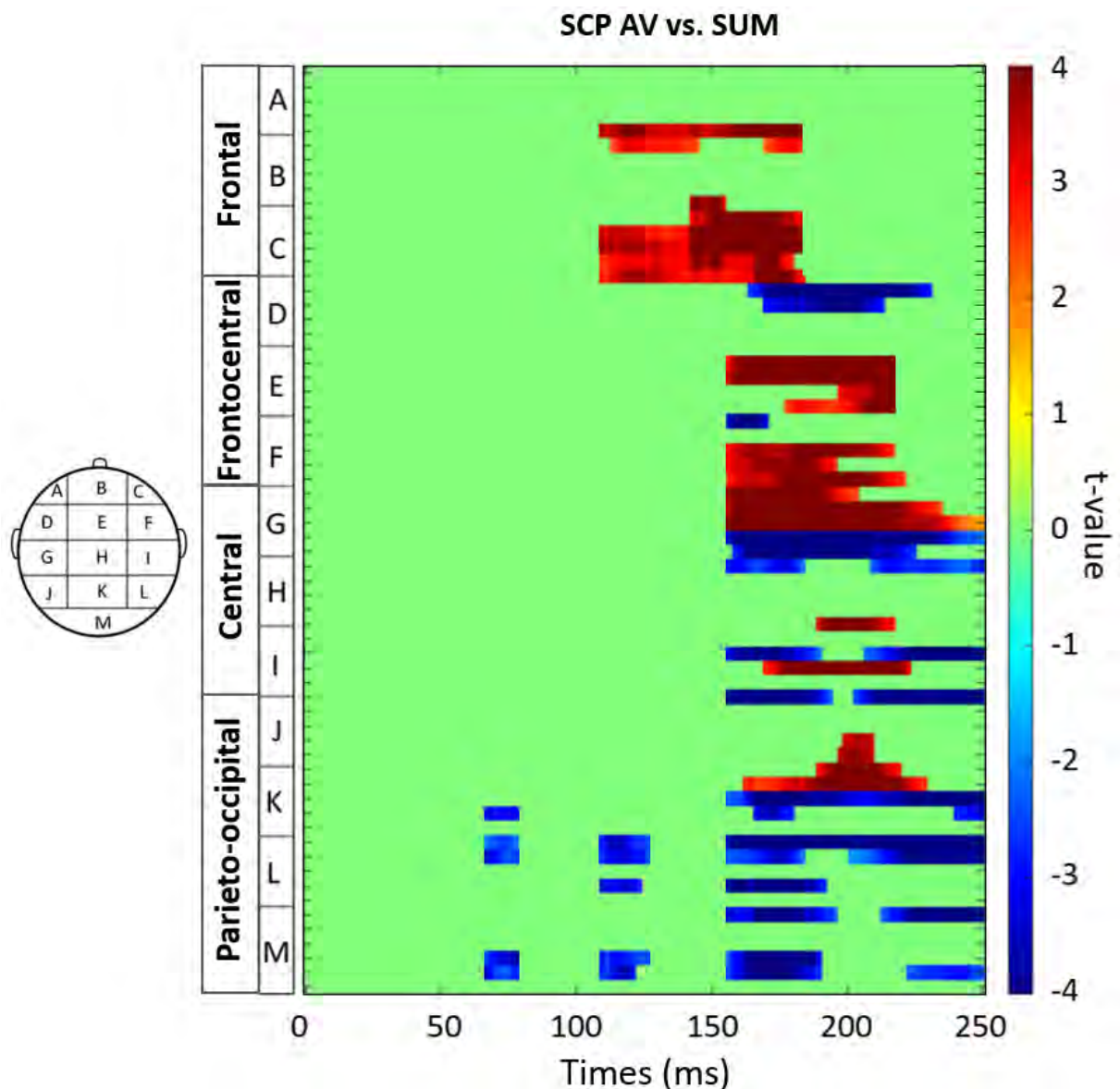


Figure 31. SCP on the overall sample (n= 37) : running t-tests comparing the multisensory and sum ERPs. The color bar indicates directionality of the effects, with green indicating an absence of significant t-values. Time is plotted in the x-axis from 0 to 250 ms. Channels are plotted in the y-axis. Starting from the top of the graph, the channels are divided into sections from anterior to posterior scalp with each letter representing 3–5 channels, the relative positions of which are located on the corresponding head.

Table 9. Spatiotemporal windows of multisensory integration

Sites	Time-window (ms)	Channels
Frontal	120-150	LH : F3, F5, F7
	150-180	RH : F4, F6, F8
Frontocentral	160-190	LH : FC1, FC3, FC5, C1, C3, C5
	190-225	RH : FC2, FC4, FC6, C2, C4, C6
		Central : FCz
Parieto-occipital	50-80	
	105-125	LH : P1, O1, PO3
	150-180	RH : P2, O2, PO4

Frontal MSI. ANOVA in the time-window of 120–150 ms over frontal channels demonstrated a main effect of Condition ($\chi^2(1) = 4, p < .05$, see Fig. 32A), due to a more negative response in the AV condition relative to the SUM condition. In the 150–180 ms time-window, a similar Condition effect was found ($\chi^2(1) = 7.95, p < .01$, see Fig. 32A). No group effect or interactions were found ($p > .15$)

Frontocentral MSI. In the time-window of 160–190 ms, a main effect of Condition was found ($\chi^2(1) = 32.61, p < .0001$), AV responses being more positive than the SUM condition. A significant interaction Group x Condition x Movement ($\chi^2(1) = 4.03, p < .05$) revealed that such multisensory integration was only found in the AQ- group for the receding condition. In the 190–225 ms time-window, a main effect of Condition ($\chi^2(1) = 36.06, p < .0001$) and an interaction Group x Condition ($\chi^2(1) = 13.87, p < .001$) revealed that only AQ- presented more positive responses in the AV condition than the SUM condition (see Fig. 32B).

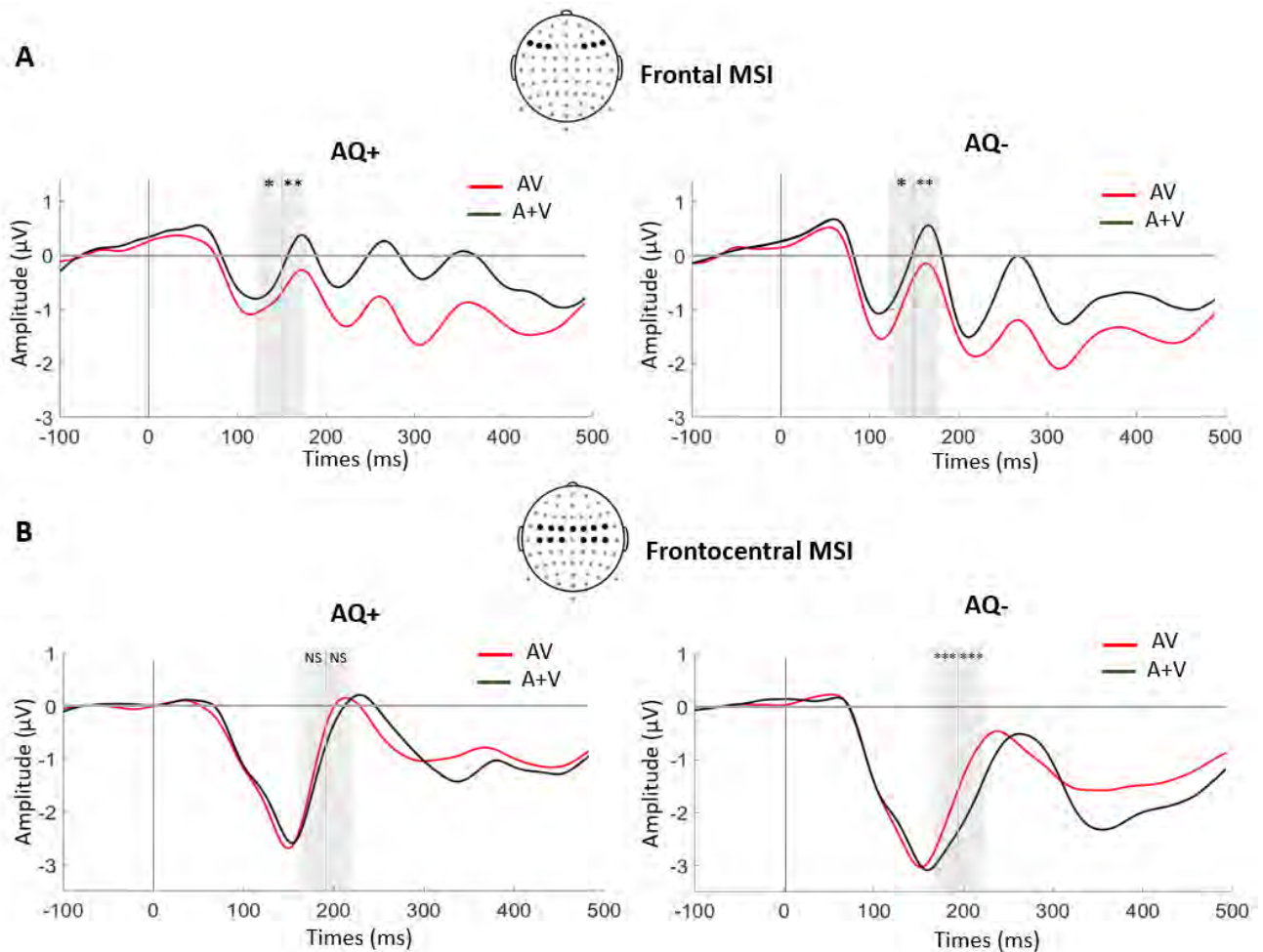


Figure 32. (A) Spatiotemporal windows of MSI over frontal channels (120-150 ms, and 150-180 ms time-windows). (B) Spatiotemporal windows of MSI over frontocentral channels (160-190 ms, and 190-225 ms time-windows). Grand average waveforms for the AV and SUM conditions averaged for each AQ group. The grey rectangles indicate the time-window used to compute the average amplitude in the analyses. *** $p < .0001$; ** $p < .01$; * $p < .05$; ^{ns}non-significant.

Parieto-occipital MSI. ANOVA in the time-window of 50–80 ms over parieto-occipital channels indicated a main effect of Condition ($\chi^2(1) = 16.9, p < .0001$), due to a more positive response in the AV condition relative to the SUM condition. As revealed by an interaction Group x Condition ($\chi^2(1) = 5.92, p < .05$) and an interaction Group x Condition x Movement ($\chi^2(1) = 5.12, p < .05$), only AQ+ presented a multisensory response more positive in amplitude than the summed response in the receding condition ($p < .0001$; see Fig. 33). In the 105–125 ms time-window, a main effect of Condition ($\chi^2(1) = 5.66, p < .05$) led by a more positive response in the AV condition relative to the SUM condition was found (see Fig. 33). Finally, in the 150–180 ms time-window, a main effect of Condition ($\chi^2(1) = 9.48, p < .01$) and an interaction Group x Condition x Movement ($\chi^2(1) = 3.87, p < .05$) revealed that only AQ- presented a MSI response ($AV > A+V$) in the looming condition ($p < .05$, see Fig. 33).

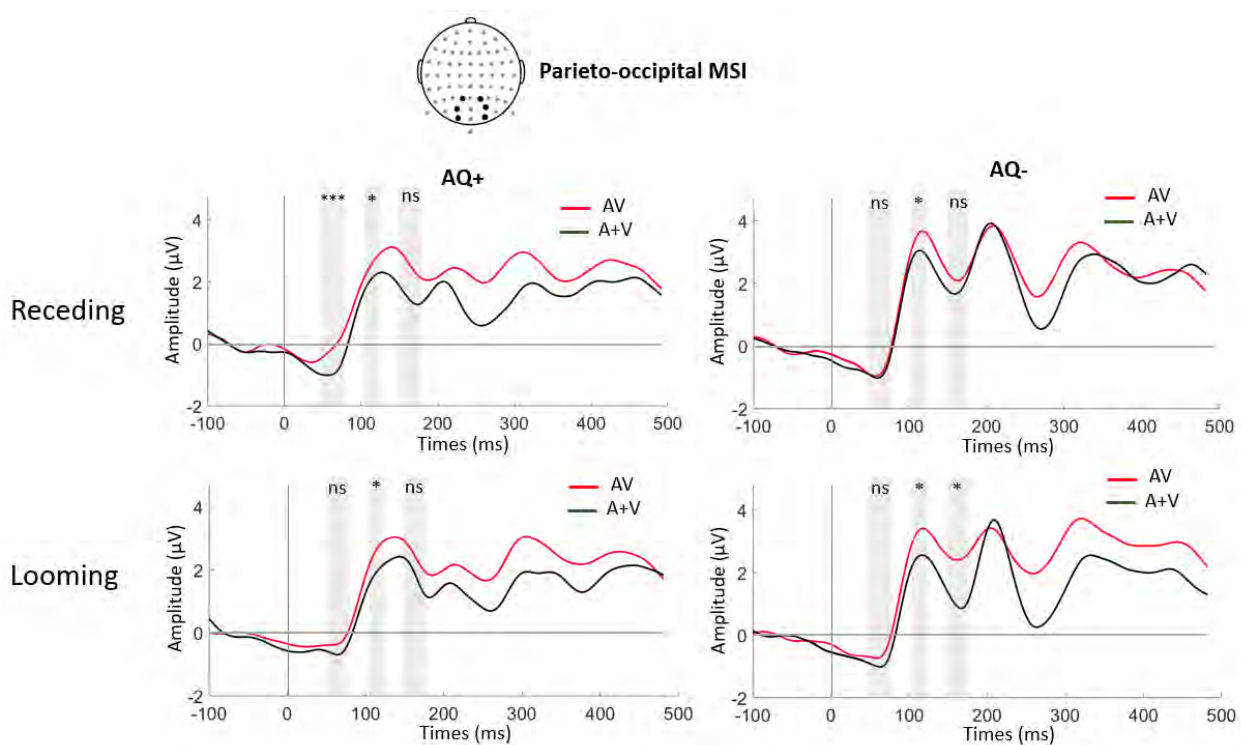


Figure 33. Spatiotemporal windows of MSI over parieto-occipital channels (50-80 ms, 105-125 ms, and 150-180 ms time-windows). Grand average waveforms for the AV and SUM conditions averaged for each AQ group in looming and receding conditions. The grey rectangles indicate the time-window used to compute the average amplitude in the analyses. *** $p < .0001$; * $p < .05$; ns, non-significant.

3.2.2.1 Topographical Analysis

The TANOVA analysis revealed differences in the topographies between groups for the global AV vs. A+V, from 62 to 76 ms, 92 ms to 148 ms, and 154 ms to 226 ms after the stimulus onset (Fig. 34). There were intergroup differences from about 215 to 250 ms after the stimulus onset in the looming condition, there ($p < .05$) and from 170 to 191 ms after the stimulus onset in the receding condition ($p < .05$).

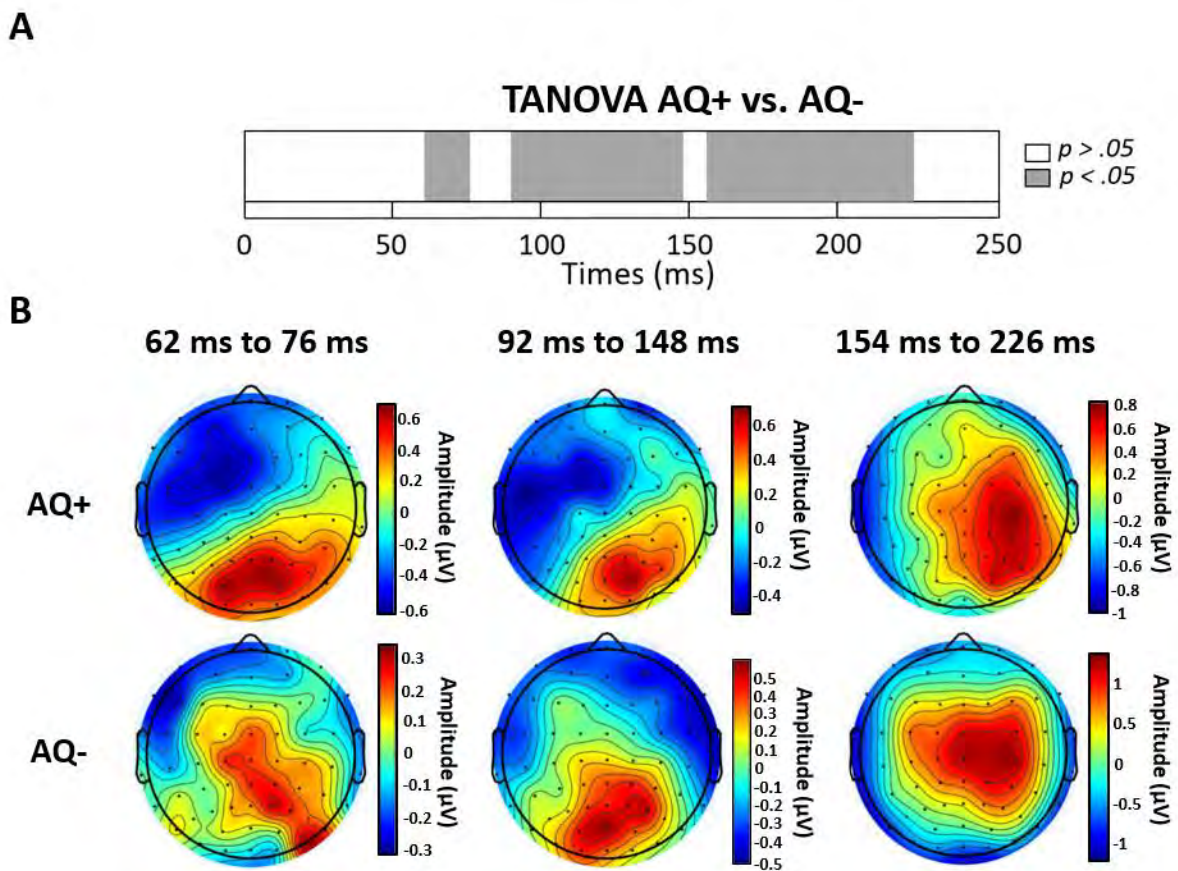


Figure 34. Topographical analysis of multisensory integration. (A) Results of the TANOVA analysis. Significant topographical differences between the AQ+ and AQ- groups are marked in grey and were observable from 62 to 76 ms, 92 ms to 148 ms, and 154 ms to 226 ms after the stimulus onset. (B) Topographies averaged over significant time-windows of the TANOVA in each AQ group. These topographical analyses align with the intergroup differences we found at the ERPs level. Overall, the AQ- group presented more MSI at frontal sites, while the MSI was mainly focused at the parieto-occipital site in the AQ+ group, which tends to evolve late (~150 ms) towards a frontal topography.

4. Discussion

Sensory particularities in ASD have commonly been conceptualized as secondary to the core of ASD (e.g., Rogers & Ozonoff, 2005). Despite renewed discussion of sensory integration deficits in ASD and their impact on cognition (Robertson & Baron-Cohen, 2017; Thye et al., 2018), to date only a few studies have investigated whether non-social MSI is intact in the autistic spectrum. These studies have yielded mixed and often contradictory results (for a review, Feldman et al., 2018). The present study applied stringent and established metrics of MSI to characterize the neural correlates of depth-moving multisensory stimuli according to the level of autistic personality traits. The resulting neurophysiological and behavioral data revealed clear differences between individuals with high and low autistic traits regarding the neural processes involved in integrating multisensory stimuli and ensuing behavioral consequences.

In line with our previous research (Poulain et al., 2023), individuals with high autistic personality traits (AQ+) demonstrated shorter RTs, especially in the audiovisual condition. However, we failed at replicating faster RTs for AQ+ in the audiovisual looming condition and the intergroup differences in correct responses. The dissimilarities in methodology between our two studies could account for these findings and involve variations in the number of trials per condition and the number of variables employed. Notably, Poulain et al. (2023) manipulated the presentation speed of stimuli which is not the case here.

Visual processing

While the literature has often reported amplitude or latency effects on N1/P1 between ASD and control subjects (for a review, Jeste & Nelson, 2009), no Group effect was found here on visual ERPs. One simple explanation could be the nature of the task. When spontaneous detection (i.e. implicit processes) is used, most studies have reported reduced P1 amplitude during passive visual stimulus presentation tasks in ASD (Constable et al., 2012; Kovarski et al., 2016, 2019; Pei et al., 2014) and in subjects with high autistic personality as well (Sutherland & Crewther, 2010). However, when the task required explicit processes (i.e. active detection task), no differences were found (Milne et al., 2009). Differentiating between spontaneous and elicited processes when investigating ASD is crucial and numerous studies have reported that implicit processing tasks without explicit instructions could foster intergroup differences while, in active tasks (e.g. detection paradigms), the effects between groups would diminish (Callenmark et al., 2014; Schaller & Rauh, 2017; Paul & Cohen, 1985). Top-down attentional processes might compensate for the difficulties of individuals with ASD or individuals with a high autistic

personality in processing explicitly visual information. Indeed, prior studies demonstrated that the level of attention allocated to the task influences the amplitudes of P1 and N1, with amplitudes increasing as attention levels rise (Luck et al., 2000; Mangun & Hillyard, 1991; Vogel & Luck, 2000). Thus, the high attentional requirement in our active task might have normalized the P1 and N1 amplitude between groups. This proposition is bolstered by the findings of Kasai & Murohashi (2013), whose study showed that non-ASD subjects with a high autistic personality retained intact top-down attentional effects in modulating P1/N1 visual ERPs. Future investigation might modulate the attentional requirement of the task across multiple contexts to assess the dynamics of such compensations.

Furthermore, a significant Movement effect on P1/N1 was observed in this study. Since P1 and N1 were recorded from channels at occipital and parietal sites, this could suggest differences in depth movement processing from the early stages of sensory processing. Indeed, specific responses to moving stimuli have already been demonstrated from V1 (Antal et al., 2003), whose nerve cells are sensitive to the orientation and direction of visual stimuli (Galletti et al., 2001) and which has been proposed as having a significant role in the discrimination of translational movements (Beckers & Zeki, 1995). In addition, early and differential movement effect aligns with neuroimaging studies highlighting distinct cortical and subcortical networks between looming and receding movements (in marmoset: Cléry et al., 2020; in human: Billington et al., 2011). Furthermore, the absence of a Group x Movement interaction suggests that both AQ+ and AQ- groups demonstrate similar visual processing of depth movement, as indicated by the P1/N1 visual ERPs. These findings align with previous studies in the ASD that have shown intact early visual sensory processing of movement (Yamasaki et al., 2011) and preserved discrimination abilities for first-order visual movements in individuals with ASD (Bertone et al., 2003).

Auditory processing

The biphasic auditory Ta-Tb response was initially named the T-complex (Bruneau et al., 1997, 2015; Shafer et al., 2011) and is deemed to emerge from the auditory cortex on the posterior lateral surface of the temporal lobe and to be involved in stimulus detection (Hackley et al., 1990; Perrault & Picton, 1984). In the present study, the auditory Ta was larger for the AQ+ group possibly reflecting higher auditory sensitivity. Specifically, sensory sensitivity has been linked to autistic traits and in many cases has been used to discriminate between ASD and non-ASD individuals. Many studies have indicated that sensory sensitivity is strongly correlated with, and even predictive of, autistic traits (Baranek et al., 2006; Crane et al., 2009; Kern et al.,

2006; Robertson & Simmons, 2013; Schulz & Stevenson, 2020; Tomchek & Dunn, 2007). Such a sensory hypersensitivity is mainly described in the auditory modality and can cause significant distress and anxiety in people with ASD. For example, Grandin (1995) called the sound of an inflated paper bag bursting "terrifying". In the few studies examining loudness perception (despite many clinical observations), ASD subjects showed lower loudness discomfort thresholds (Khalfa et al., 2004) and were more likely to show discomfort to sounds below 80 dB(HL) compared to control individuals (Rosenhall et al., 1999). In a recent study conducted by Cary et al. (2023), individuals with high autistic traits and sensory over-responsivity exhibited reduced habituation and heightened discrimination of auditory stimuli. This was evident through higher P1 responses when presenting repeated stimuli and higher mismatch negativity (MMN) responses, respectively. Thus, a link could be considered between the amplitude of Ta and the level of auditory sensitivity of AQ+, the auditory cortex reacting more strongly to sensory stimuli, consequently generating the feeling of hypersensitivity. At the behavioral level, the fact that the AQ+ presented lower correct responses in the auditory condition could join the notion of overload, which would be deleterious at the behavioral level. More precisely, in many cases, this increased sensitivity appears to be accompanied by a feeling of over-arousal (an overwhelming level of sensory input) or hyperacusis (where seemingly innocuous sounds are perceived as distressing, Gomes et al., 2008).

For the ERP Tb, while prior studies have exclusively focused on ASD and systematically found a reduction of the amplitude in ASD subjects (Azouz et al., 2014; Bidet-Caulet et al., 2017; Brandwein et al., 2013; Bruneau et al., 1999, 2003; Orekhova et al., 2009), we did not find any intergroup difference. Latinus et al. (2019) have found a larger variability in the latency range of the Tb peak in ASD, suggesting a decreased neural synchrony in auditory areas generating Tb. A previous study on visual ERPs also suggested that amplitude differences could be attributed to increased variability in single-trial latency (Kovarski et al., 2019). Therefore, it cannot be disregarded that intergroup differences in Tb amplitude are related to variability in ASD neural responses. Moreover, Latinus and colleagues (2019) reported that children with ASD characterized by small inter-trial consistencies were the younger ones and presented a clinical profile mainly characterized by a lower verbal developmental quotient, and a lack of effort toward communication (Latinus et al., 2019). These results consolidate the growing hypothesis of a link between a reduced and inconsistent Tb with language delay in ASD individuals (O'Connor, 2012; Tager-Flusberg et al., 2011; Williams et al., 2021). Collectively, these findings align with our own results, which indicated no significant differences in Tb among adult participants without any language difficulties.

In addition, our study revealed intergroup differences on auditory N1b. The literature reported controversial results on this auditory component. Most of the studies have reported no effect of ASD on N1b amplitude (Courchesne et al., 1985; Crasta, 2017; Kemner, Verbaten, Cuperus, Camfferman, & Engeland, 1995; Lincoln et al., 1995; Nakamura et al., 1986; Novick et al., 1980). However, amplitude increases (Oades et al., 1988) and decreases (Brandwein et al., 2015; Bruneau et al., 1999; Ferri et al., 2003; Martineau et al., 1984; Seri et al., 1999) in ASD compared to controls have also been reported and were interpreted as an ineffective regulation of auditory sensory input in ASD (for a review, Bomba & Pang, 2004). A recent meta-analysis (Williams et al., 2021) suggested a potential moderator effect of sample intellectual functioning on the magnitude of N1b amplitude differences. However, because at least two studies had also reported a smaller N1b in ASD when controls also had intellectual disability (Bruneau et al., 1999; Seri et al., 1999), the role of IQ on N1b amplitude remains to be discussed. We observed that the N1b in the AQ- group exhibited higher amplitude during the receding condition compared to the looming condition, a distinction not observed in the AQ+ group. An identical result was also found in the crossmodal ERP analyzed in a similar time-window. More precisely, we investigated the auditory ERP highlighted in the study by Campus et al. (2017) which was interpreted as an early response of the occipital cortex to sound. Our intergroup differences revealed that AQ- presented a higher amplitude for receding auditory stimuli, which generally led to behavioral difficulties for the participants (longer RT, lower %RC). Thus, the receding auditory condition causing discrimination difficulties could have generated, in the AQ-, an amplitude increase of not only N1b but also crossmodal ERP. This suggests the involvement of a visual strategy to process auditory stimuli in motion efficiently and improve detection performance, as no auditory cortical area is dedicated to movement processing (for a review, see Ilg, 2008). It might appear counterintuitive that AQ+ displayed reduced activation in the visual cortex when exposed to auditory stimuli. Indeed, it has been largely suggested that individuals with ASD are more inclined towards "visual thinking" (Grandin, 2009), exhibiting a greater abundance of mental images compared to control individuals (Ozsivadjian et al., 2017; Bled et al., 2021). This characteristic has also been observed in individuals with high autistic traits (Orm et al., 2021). One possible explanation for this observation is that the phenomenon of mental imagery is primarily driven by top-down processes (Frith & Dolan, 1997; Mechelli et al., 2004; Stokes et al., 2009), occurring at later stages (> 200 ms, Farah, 1989; Ganis & Schendan, 2008; Schendan & Ganis, 2012). Consequently, it could imply delayed recruitment of visual areas in auditory processing among individuals with ASD and with high autistic personality. This aligns with the findings of (Kemner et al., 1995) who demonstrated that

auditory sounds elicited a higher amplitude of late visual P3 ERP at occipital site in ASD compared to control subjects. An alternative explanation posits that the observed intergroup differences in the crossmodal ERP are specifically related to moving sound and reflect several difficulties for individuals with high autistic personality in processing auditory movement.

Another interpretation could be based on predictive coding theories in the sensory cortex. More concretely, the participant expected to perceive one of the three stimuli in a task involving auditory, visual and audiovisual stimuli. Activating sensory priors would generate non-specific pre-activation within each sensory area (auditory and visual), as has been proposed in theories of predictive coding in the sensory cortex (for a review, Kok & de Lange, 2015). Thus, the intergroup differences could result from a flaw in the construction of priors in the AQ+ group, which has been widely demonstrated for auditory and visual modality in ASD (e.g., Pellicano & Burr, 2012; Stroganova et al., 2013) and in the high autistic personality (e.g., Cary et al., 2023; Karvelis et al., 2018). Note that such a hypothesis could not explain the movement interaction we found and that no significant peak activation was found at the level of temporal channels for visual stimuli. Nevertheless, it would be appropriate to develop an EEG study composed of only auditory, visual, or audiovisual isolated block of trials to test if the responses of the auditory ERP from occipital channels and visual ERP from temporal channels differ from a task in which the auditory, visual and audiovisual stimuli are randomized.

Multisensory integration

Our results demonstrated early intergroup differences, indicating the existence of distinct networks involved in multisensory integration from the early stages according to the level of autistic traits. More precisely, AQ+ presented MSI at parieto-occipital site from 50 ms post-stimulus, whereas MSI was more consistent at frontocentral site for AQ- at a later stage (from 160 ms post-stimulus). Such results aligned with studies that explored the neuronal correlates of MSI in ASD and found non-linear responses, particularly in the sensory areas. Russo et al. (2010), using audio-tactile stimuli, demonstrated evidence of MSI at temporal sites in ASD, while control subjects also presented MSI but at frontocentral sites. A similar result has been found in other studies using simple, non-social audiovisual stimuli in a basic detection task (Brandwein et al., 2013; Molholm et al., 2020). For example, Stefanou et al. (2020) demonstrated indexes of MSI restricted to parieto-occipital sites in ASD, which progressed later towards central sites compared to control subjects who presented MSI at centrottemporal level, which evolved in a widespread way on the scalp. The MSI at parietal level from 100 ms seems specifically related to ASD and would even predict the severity of ASD symptoms (Brandwein

et al., 2015). These results referred to the enhanced perceptual functioning model, a well-established ASD model (Mottron et al., 2006; Mottron & Burack, 2001), proposing that cerebral plasticity in low-level brain areas in ASD leads to enhanced activation in these specific brain areas, referred to as “areas of strength”, generating a preference toward a low-level of processing. This specific recruitment of the sensory sites in ASD would result from disrupted connectivity in ASD between short- and long-distance cortical regions (Just, 2004; Wass, 2011). For example, individuals with ASD showed reduced synchronization between frontal and parietal areas while performing an executive functioning task (Just et al., 2007). Anatomical evidence for diminished long-distance connectivity in ASD includes findings of reduced integrity of the callosal fibers connecting sensory cortices and prefrontal areas (Barnea-Goraly et al., 2004). In addition, atypical developmental trajectories for cerebral white matter volume (for a review, see Courchesne & Pierce, 2005), and according to postmortem studies, abnormal microcircuitry of minicolumns were found in ASD which may alter local as well as long-range cortical connections (Buxhoeveden et al., 2006; Casanova et al., 2002). Underconnectivity in ASD implies that any facet of psychological function that is dependent on the coordination or integration of brain regions is susceptible to particularities (Brock et al., 2002; Just, 2004). Since merging separate sensory inputs into a common percept necessarily requires inter-regional collaboration between separate sensory brain areas (Driver & Noesselt, 2008; Ghazanfar & Schroeder, 2006), a lack of long-distance connectivity between the frontocentral and the sensory areas within the autistic spectrum may have generated intergroup differences in the present study. By directing a bias towards the sensory areas to integrate the multisensory information, AQ+ presented integrative processes as early as 50 ms (vs. 100 ms in AQ-), which may have contributed to the generation of faster RT in the audiovisual condition.

AQ- participants presented different integration sites depending on the movement, more at parieto-occipital level for the looming movement and at frontocentral site for the receding. Conversely, AQ+ showed no specific integration for the looming movement and presented particular early integration at parieto-occipital site for the receding movement. Moreover, our behavioral results highlighted the presence of multisensory facilitation for AQ+ in the receding movement, which was not the case for AQ-. The receding movement could be transposed in AQ+ and ASD to the tendency to isolate oneself by moving away from social contact, which has been commonly evidenced in ASD (Dawson et al., 1998, 2004). People closely monitor and appropriately regulate their interpersonal space to obtain a comfortable interaction distance. Such space refers to the peri-personal space (PPS) that Gessaroli et al. (2013) explored in ASD using self-receding movement facing another person or the other person moving away from

ASD participants while facing them to delineate the distance at which ASD participants felt most comfortable. Results indicated a larger PPS in the ASD, reflecting social-avoidance behavior. ASD participants exhibited behavior suggesting that they perceived social proximity as a threat, emphasizing the significance of receding movement in ASD. It can be inferred that individuals with ASD often resort to avoidance behaviors, such as distancing themselves to adapt social distance from other individuals. This frequent engagement in distancing behaviors contributes to the development of sensory perception related to these behaviors and consequently enhances their MSI abilities. This notion aligns closely with previous studies (Powers et al., 2009; Stevenson et al., 2013) that demonstrate the malleability of the IMS based on sensory experiences.

However, even if AQ+ did not present any specific MSI of looming movements, no difference in the Race Model violations was found between the AQ groups. Since at the neurophysiological level, we found differences in movement integration, it is possible that later attentional mechanisms were involved in the AQ+ group to compensate for intergroup differences. More precisely, integration occurs at different stages, with MSI at early sensory and pre-attentive stages (early MSI) occurring automatically and independent of attention, while later MSI (late MSI) is necessarily modulated by attention (Koelewijn et al., 2010). The idea of top-down attention during the later stages (> 300 ms) of MSI strengthens the notion that autistic individuals can integrate as long as they focus their attention, which could explain why there are no noticeable differences in behavior between ASD subjects and control subjects in some studies (e.g., Molholm et al., 2020; Stefanou et al., 2020). In the present study, it is possible that the AQ+ group learned to voluntarily orient itself towards looming stimuli, which constitute a crucial signal, potentially dangerous or anxiety-inducing (information of a person approaching to interact). Thus, the increased attention may allow ASD subjects or subjects with high autistic traits to overcome any deficiencies in looming MSI during the later stages of processing.

5. Summary

To summarize, this study provides evidence for sensory particularities according to the level of autistic traits. Specifically, beyond intergroup differences found at the level of visual and auditory ERPs reflecting early stages of information processing, differences were also found at early stages of integration, suggesting more multisensory integration (MSI) in sensory areas and less extensive MSI in the frontocentral areas among individuals with high autistic traits. Investigating such information is crucial, given the dynamic and multisensory nature of our environment. This research contributes to a better understanding of the daily challenges faced across the autistic spectrum, highlighting the possibility that low-level stages of multisensory integration and unisensory processing may operate differently according to the intensity of autistic traits. These findings further contribute to the ongoing discourse on the consequential impact of perceptual particularities on the development of social abilities.

6. References

- Alemany, S., Blok, E., Jansen, P. R., Muetzel, R. L., & White, T. (2021). Brain morphology, autistic traits, and polygenic risk for autism : A population-based neuroimaging study. *Autism Research*, 14(10), 2085-2099. <https://doi.org/10.1002/aur.2576>
- Antal, A., Kincses, T. Z., Nitsche, M. A., & Paulus, W. (2003). Modulation of moving phosphene thresholds by transcranial direct current stimulation of V1 in human. *Neuropsychologia*, 41(13), 1802-1807. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(03\)00181-7](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(03)00181-7)
- APA. (2013). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders (DSM-5)*. American Psychiatric Association, Washington, DC.
- Azouz, H. G., Kozou, H., Khalil, M., Abdou, R. M., & Sakr, M. (2014). The correlation between central auditory processing in autistic children and their language processing abilities. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 78(12), 2297-2300. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2014.10.039>
- Baranek, G. T., David, F. J., Poe, M. D., Stone, W. L., & Watson, L. R. (2006). Sensory Experiences Questionnaire : Discriminating sensory features in young children with autism, developmental delays, and typical development. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 47(6), 591-601. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2005.01546.x>
- Barnea-Goraly, N., Kwon, H., Menon, V., Eliez, S., Lotspeich, L., & Reiss, A. L. (2004). White matter structure in autism : Preliminary evidence from diffusion tensor imaging. *Biological Psychiatry*, 55(3), 323-326. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2003.10.022>
- Baron-Cohen, S., Wheelwright, S., Skinner, R., Martin, J., & Clubley, E. (2001). The autism-spectrum quotient (AQ) : Evidence from Asperger syndrome/high-functioning autism, males and females, scientists and mathematicians. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 31(1), 5-17. <https://doi.org/10.1023/A:1005653411471>
- Barth, D. S., Goldberg, N., Brett, B., & Di, S. (1995). The spatiotemporal organization of auditory, visual, and auditory-visual evoked potentials in rat cortex. *Brain Research*, 678(1-2), 177-190. [https://doi.org/10.1016/0006-8993\(95\)00182-p](https://doi.org/10.1016/0006-8993(95)00182-p)
- Beckers, G., & Zeki, S. (1995). The consequences of inactivating areas V1 and V5 on visual motion perception. *Brain: A Journal of Neurology*, 118 (Pt 1), 49-60. <https://doi.org/10.1093/brain/118.1.49>

- Bell, A. J., & Sejnowski, T. J. (1995). An information-maximization approach to blind separation and blind deconvolution. *Neural Computation*, 7(6), 1129-1159. <https://doi.org/10.1162/neco.1995.7.6.1129>
- Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995). Controlling the False Discovery Rate : A Practical and Powerful Approach to Multiple Testing. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 57(1), 289-300. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1995.tb02031.x>
- Berman, A. L. (1961). INTERACTION OF CORTICAL RESPONSES TO SOMATIC AND AUDITORY STIMULI IN ANTERIOR ECTOSYLVIAN GYRUS OF CAT. *Journal of Neurophysiology*, 24(6), 608-620. <https://doi.org/10.1152/jn.1961.24.6.608>
- Bertone, A., Mottron, L., Jelenic, P., & Faubert, J. (2003). Motion Perception in Autism : A “Complex” Issue. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(2), 218-225. <https://doi.org/10.1162/089892903321208150>
- Bidet-Caulet, A., Latinus, M., Roux, S., Malvy, J., Bonnet-Brilhault, F., & Bruneau, N. (2017). Atypical sound discrimination in children with ASD as indicated by cortical ERPs. *Journal of Neurodevelopmental Disorders*, 9, 13. <https://doi.org/10.1186/s11689-017-9194-9>
- Billington, J., Wilkie, R. M., Field, D. T., & Wann, J. P. (2011). Neural processing of imminent collision in humans. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 278(1711), 1476-1481. <https://doi.org/10.1098/rspb.2010.1895>
- Bled C, Guillon Q, Soulières I, Bouvet L. Thinking in pictures in everyday life situations among autistic adults. *PLoS One*. 2021 Jul 22;16(7):e0255039. doi: 10.1371/journal.pone.0255039. PMID: 34293061; PMCID: PMC8297849.
- Bomba, M. D., & Pang, E. W. (2004). Cortical auditory evoked potentials in autism: A review. *International Journal of Psychophysiology*, 53(3), 161-169. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2004.04.001>
- Brandwein, A. B., Foxe, J. J., Butler, J. S., Frey, H.-P., Bates, J. C., Shulman, L. H., & Molholm, S. (2015). Neurophysiological Indices of Atypical Auditory Processing and Multisensory Integration are Associated with Symptom Severity in Autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 45(1), 230-244. <https://doi.org/10.1007/s10803-014-2212-9>
- Brandwein, A. B., Foxe, J. J., Butler, J. S., Russo, N. N., Altschuler, T. S., Gomes, H., & Molholm, S. (2013). The Development of Multisensory Integration in High-Functioning Autism: High-Density Electrical Mapping and Psychophysical Measures Reveal Impairments in the Processing of Audiovisual Inputs. *Cerebral Cortex*, 23(6), 1329-1341. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhs109>
- Brock, J., Brown, C. C., Boucher, J., & Rippon, G. (2002). The temporal binding deficit hypothesis of autism. *Development and Psychopathology*, 14(2), 209-224. <https://doi.org/10.1017/s0954579402002018>
- Bruneau, N., Bidet-Caulet, A., Roux, S., Bonnet-Brilhault, F., & Gomot, M. (2015). Asymmetry of temporal auditory T-complex : Right ear–left hemisphere advantage in Tb timing in children. *International Journal of Psychophysiology*, 95(2), 94-100. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2014.07.012>
- Bruneau, N., Bonnet-Brilhault, F., Gomot, M., Adrien, J.-L., & Barthélémy, C. (2003). Cortical auditory processing and communication in children with autism: Electrophysiological/behavioral relations. *International Journal of Psychophysiology*, 51(1), 17-25. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(03\)00149-1](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(03)00149-1)
- Bruneau, N., Roux, S., Adrien, J. L., & Barthélémy, C. (1999). Auditory associative cortex dysfunction in children with autism : Evidence from late auditory evoked potentials (N1 wave-T complex). *Clinical Neurophysiology: Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 110(11), 1927-1934. [https://doi.org/10.1016/s1388-2457\(99\)00149-2](https://doi.org/10.1016/s1388-2457(99)00149-2)
- Bruneau, N., Roux, S., Guérin, P., Barthélémy, C., & Lelord, G. (1997). Temporal prominence of auditory evoked potentials (N1 wave) in 4-8-year-old children. *Psychophysiology*, 34(1), 32-38. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1997.tb02413.x>
- Buchwald, J. S., Erwin, R., Van Lancker, D., Guthrie, D., Schwafel, J., & Tanguay, P. (1992). Midlatency auditory evoked responses: P1 abnormalities in adult autistic subjects. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 84(2), 164-171. [https://doi.org/10.1016/0168-5597\(92\)90021-3](https://doi.org/10.1016/0168-5597(92)90021-3)

- Buxhoeveden, D. P., Semendeferi, K., Buckwalter, J., Schenker, N., Switzer, R., & Courchesne, E. (2006). Reduced minicolumns in the frontal cortex of patients with autism. *Neuropathology and Applied Neurobiology*, 32(5), 483-491. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2990.2006.00745.x>
- Callenmark, B., Kjellin, L., Rönqvist, L., & Bölte, S. (2014). Explicit versus implicit social cognition testing in autism spectrum disorder. *Autism: The International Journal of Research and Practice*, 18(6), 684-693. <https://doi.org/10.1177/1362361313492393>
- Campus, C., Sandini, G., Concetta Morrone, M., & Gori, M. (2017). Spatial localization of sound elicits early responses from occipital visual cortex in humans. *Scientific Reports*, 7(1), 10415. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09142-z>
- Cappe, C., Thelen, A., Romei, V., Thut, G., & Murray, M. M. (2012). Looming Signals Reveal Synergistic Principles of Multisensory Integration. *Journal of Neuroscience*, 32(4), 1171-1182. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5517-11.2012>
- Cappe, C., Thut, G., Romei, V., & Murray, M. M. (2009). Selective integration of auditory-visual looming cues by humans. *Neuropsychologia*, 47(4), 1045-1052. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2008.11.003>
- Cary, E., Pacheco, D., Kaplan-Kahn, E., McKernan, E., Matsuba, E., Prieve, B., & Russo, N. (2023). Brain Signatures of Early and Late Neural Measures of Auditory Habituation and Discrimination in Autism and Their Relationship to Autistic Traits and Sensory Overresponsivity. *Journal of Autism and Developmental Disorders*. <https://doi.org/10.1007/s10803-022-05866-8>
- Casanova, M. F., Buxhoeveden, D. P., Switala, A. E., & Roy, E. (2002). Minicolumnar pathology in autism. *Neurology*, 58(3), 428-432. <https://doi.org/10.1212/wnl.58.3.428>
- Centelles, L., Assaiante, C., Etchegoyhen, K., Bouvard, M., & Schmitz, C. (2013). From action to interaction : Exploring the contribution of body motion cues to social understanding in typical development and in autism spectrum disorders. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 43(5), 1140-1150. <https://doi.org/10.1007/s10803-012-1655-0>
- Ceponiene, R., Lepistö, T., Alku, P., Aro, H., & Näätänen, R. (2003). Event-related potential indices of auditory vowel processing in 3-year-old children. *Clinical Neurophysiology: Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 114(4), 652-661. [https://doi.org/10.1016/s1388-2457\(02\)00436-4](https://doi.org/10.1016/s1388-2457(02)00436-4)
- Ceponiene, R., Lepistö, T., Shestakova, A., Vanhala, R., Alku, P., Näätänen, R., & Yaguchi, K. (2003). Speech-sound-selective auditory impairment in children with autism : They can perceive but do not attend. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(9), 5567-5572. <https://doi.org/10.1073/pnas.0835631100>
- Clark, A. I., Hughes, P. S., Grube, M., & Stewart, M. E. (2013). Autistic Traits and Sensitivity to Interference With Flavour Identification : Autistic traits and flavour perception. *Autism Research*, 6(5), 332-336. <https://doi.org/10.1002/aur.1293>
- Cléry, J. C., Schaeffer, D. J., Hori, Y., Gilbert, K. M., Hayrynen, L. K., Gati, J. S., Menon, R. S., & Everling, S. (2020). Looming and receding visual networks in awake marmosets investigated with fMRI. *NeuroImage*, 215, 116815. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.116815>
- Constable, P. A., Gaigg, S. B., Bowler, D. M., & Thompson, D. A. (2012). Motion and pattern cortical potentials in adults with high-functioning autism spectrum disorder. *Documenta Ophthalmologica*, 125(3), 219-227. <https://doi.org/10.1007/s10633-012-9349-7>
- Courchesne, E., Lincoln, A. J., Kilman, B. A., & Galambos, R. (1985). Event-related brain potential correlates of the processing of novel visual and auditory information in autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 15(1), 55-76. <https://doi.org/10.1007/BF01837899>
- Courchesne, E., & Pierce, K. (2005). Brain overgrowth in autism during a critical time in development : Implications for frontal pyramidal neuron and interneuron development and connectivity. *International Journal of Developmental Neuroscience: The Official Journal of the International Society for Developmental Neuroscience*, 23(2-3), 153-170. <https://doi.org/10.1016/j.ijdevneu.2005.01.003>
- Crane, L., Goddard, L., & Pring, L. (2009). Sensory processing in adults with autism spectrum disorders. *Autism*, 13(3), 215-228. <https://doi.org/10.1177/1362361309103794>

- Crasta, J. E. (2017). Examining the Relationship between Sensory Processing and Attention in Individuals with Autism Spectrum Disorders. <https://mountainscholar.org/handle/10217/185666>
- Dawson, G., Meltzoff, A. N., Osterling, J., Rinaldi, J., & Brown, E. (1998). Children with autism fail to orient to naturally occurring social stimuli. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 28(6), 479-485. <https://doi.org/10.1023/a:1026043926488>
- Dawson, G., Toth, K., Abbott, R., Osterling, J., Munson, J., Estes, A., & Liaw, J. (2004). Early social attention impairments in autism: Social orienting, joint attention, and attention to distress. *Developmental Psychology*, 40(2), 271-283. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.40.2.271>
- Delorme, A., & Makeig, S. (2004). EEGLAB: An open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *Journal of Neuroscience Methods*, 134(1), 9-21. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2003.10.009>
- Donkers, F. C. L., Schipul, S. E., Baranek, G. T., Cleary, K. M., Willoughby, M. T., Evans, A. M., Bulluck, J. C., Lovmo, J. E., & Belger, A. (2015). Attenuated Auditory Event-Related Potentials and Associations with Atypical Sensory Response Patterns in Children with Autism. *Journal of autism and developmental disorders*, 45(2), 506-523. <https://doi.org/10.1007/s10803-013-1948-y>
- Donohue, S. E., Darling, E. F., & Mitroff, S. R. (2012). Links between multisensory processing and autism. *Experimental Brain Research*, 222(4), 377-387. <https://doi.org/10.1007/s00221-012-3223-4>
- Driver, J., & Noesselt, T. (2008). Multisensory interplay reveals crossmodal influences on « sensory-specific » brain regions, neural responses, and judgments. *Neuron*, 57(1), 11-23. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2007.12.013>
- Farah, M. J. (1989). The neural basis of mental imagery. *Trends in Neurosciences*, 12(10), 395-399. [https://doi.org/10.1016/0166-2236\(89\)90079-9](https://doi.org/10.1016/0166-2236(89)90079-9)
- Feldman, J. I., Dunham, K., Cassidy, M., Wallace, M. T., Liu, Y., & Woynaroski, T. G. (2018). Audiovisual multisensory integration in individuals with autism spectrum disorder: A systematic review and meta-analysis. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 95, 220-234. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2018.09.020>
- Ferri, R., Elia, M., Agarwal, N., Lanuzza, B., Musumeci, S. A., & Pennisi, G. (2003). The mismatch negativity and the P3a components of the auditory event-related potentials in autistic low-functioning subjects. *Clinical Neurophysiology: Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 114(9), 1671-1680. [https://doi.org/10.1016/s1388-2457\(03\)00153-6](https://doi.org/10.1016/s1388-2457(03)00153-6)
- Freitag, C. M., Konrad, C., Häberlen, M., Kleser, C., von Gontard, A., Reith, W., Troje, N. F., & Krick, C. (2008). Perception of biological motion in autism spectrum disorders. *Neuropsychologia*, 46(5), 1480-1494. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2007.12.025>
- Frith, C., & Dolan, R. J. (1997). Brain mechanisms associated with top-down processes in perception. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 352(1358), 1221-1230. <https://doi.org/10.1098/rstb.1997.0104>
- Galletti, C., Gamberini, M., Kutz, D. F., Fattori, P., Luppino, G., & Matelli, M. (2001). The cortical connections of area V6: An occipito-parietal network processing visual information. *The European Journal of Neuroscience*, 13(8), 1572-1588. <https://doi.org/10.1046/j.0953-816x.2001.01538.x>
- Ganis, G., & Schendan, H. E. (2008). Visual mental imagery and perception produce opposite adaptation effects on early brain potentials. *NeuroImage*, 42(4), 1714-1727. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.07.004>
- Gessaroli, E., Santelli, E., Di Pellegrino, G., & Frassinetti, F. (2013). Personal Space Regulation in Childhood Autism Spectrum Disorders. *PLoS ONE*, 8(9), e74959. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0074959>
- Ghazanfar, A., & Schroeder, C. (2006). Is neocortex essentially multisensory? *Trends in Cognitive Sciences*, 10(6), 278-285. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2006.04.008>
- Gomes, E., Pedroso, F. S., & Wagner, M. B. (2008). Auditory hypersensitivity in the autistic spectrum disorder. *Pro-Fono: Revista De Atualizacao Cientifica*, 20(4), 279-284. <https://doi.org/10.1590/s0104-56872008000400013>

- Gondan, M., & Minakata, K. (2016). A tutorial on testing the race model inequality. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 78(3), 723-735. <https://doi.org/10.3758/s13414-015-1018-y>
- Grandin, T. (1995). *Ma vie d'autiste*. Odile Jacob.
- Grandin, T. (2009). How does visual thinking work in the mind of a person with autism? A personal account. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1522), 1437-1442. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0297>
- Grinter, E. J., Maybery, M. T., Van Beek, P. L., Pellicano, E., Badcock, J. C., & Badcock, D. R. (2009). Global Visual Processing and Self-Rated Autistic-like Traits. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 39(9), 1278-1290. <https://doi.org/10.1007/s10803-009-0740-5>
- Guthrie, D., & Buchwald, J. S. (1991). Significance testing of difference potentials. *Psychophysiology*, 28(2), 240-244. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1991.tb00417.x>
- Hackley, S. A., Woldorff, M., & Hillyard, S. A. (1990). Cross-Modal Selective Attention Effects on Retinal, Myogenic, Brainstem, and Cerebral Evoked Potentials. *Psychophysiology*, 27(2), 195-208. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1990.tb00370.x>
- Hirai, M., Gunji, A., Inoue, Y., Kita, Y., Hayashi, T., Nishimaki, K., Nakamura, M., Kakigi, R., & Inagaki, M. (2014). Differential electrophysiological responses to biological motion in children and adults with and without autism spectrum disorders. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 8(12), 1623-1634. <https://doi.org/10.1016/j.rasd.2014.08.014>
- Hu, Y., Chen, Z., Huang, L., Xi, Y., Li, B., Wang, H., Yan, J., Lee, T. M. C., Tao, Q., So, K.-F., & Ren, C. (2017). A translational study on looming-evoked defensive response and the underlying subcortical pathway in autism. *Scientific Reports*, 7(1), 14755. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15349-x>
- Ilg, U. J. (2008). The role of areas MT and MST in coding of visual motion underlying the execution of smooth pursuit. *Vision Research*, 48(20), 2062-2069. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2008.04.015>
- Jeste, S. S., & Nelson, C. A. (2009). Event Related Potentials in the Understanding of Autism Spectrum Disorders : An Analytical Review. *Journal of autism and developmental disorders*, 39(3), 495-510. <https://doi.org/10.1007/s10803-008-0652-9>
- Johansson, G. (1973). Visual perception of biological motion and a model for its analysis. *Perception & Psychophysics*, 14(2), 201-211. <https://doi.org/10.3758/BF03212378>
- Just, M. A. (2004). Cortical activation and synchronization during sentence comprehension in high-functioning autism: Evidence of underconnectivity. *Brain*, 127(8), 1811-1821. <https://doi.org/10.1093/brain/awh199>
- Just, M. A., Cherkassky, V. L., Keller, T. A., Kana, R. K., & Minshew, N. J. (2007). Functional and anatomical cortical underconnectivity in autism : Evidence from an fMRI study of an executive function task and corpus callosum morphometry. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, 17(4), 951-961. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhl006>
- Karvelis, P., Seitz, A. R., Lawrie, S. M., & Seriès, P. (2018). Autistic traits, but not schizotypy, predict increased weighting of sensory information in Bayesian visual integration. *eLife*, 7, e34115. <https://doi.org/10.7554/eLife.34115>
- Kasai, T., & Murohashi, H. (2013). Global visual processing decreases with autistic-like traits : A study of early lateralized potentials with spatial attention. *Japanese Psychological Research*, 55(2), 131-143. <https://doi.org/10.1111/jpr.12014>
- Kemner, C., Verbaten, M. N., Cuperus, J. M., Camfferman, G., & Engeland, H. van. (1995). Auditory event-related brain potentials in autistic children and three different control groups. *Biological Psychiatry*, 38(3), 150-165. [https://doi.org/10.1016/0006-3223\(94\)00247-Z](https://doi.org/10.1016/0006-3223(94)00247-Z)
- Kemner, C., Verbaten, M. N., Cuperus, J. M., Camfferman, G., & van Engeland, H. (1995). Auditory event-related brain potentials in autistic children and three different control groups. *Biological Psychiatry*, 38(3), 150-165. [https://doi.org/10.1016/0006-3223\(94\)00247-Z](https://doi.org/10.1016/0006-3223(94)00247-Z)
- Kempnaers, C., Braun, S., Delvaux, N., & Linkowski, P. (2017). The assessment of autistic traits with the Autism Spectrum Quotient : Contribution of the French version to its construct validity. *European Review of Applied Psychology*, 67(6), 299-306. <https://doi.org/10.1016/j.erap.2017.09.001>

- Kern, J. K., Trivedi, M. H., Garver, C. R., Grannemann, B. D., Andrews, A. A., Savla, J. S., Johnson, D. G., Mehta, J. A., & Schroeder, J. L. (2006). The pattern of sensory processing abnormalities in autism. *Autism*, 10(5), 480-494. <https://doi.org/10.1177/1362361306066564>
- Khalfa, S., Bruneau, N., Rogé, B., Georgieff, N., Veuillet, E., Adrien, J.-L., Barthélémy, C., & Collet, L. (2004). Increased perception of loudness in autism. *Hearing Research*, 198(1-2), 87-92. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2004.07.006>
- Koelewijn, T., Bronkhorst, A., & Theeuwes, J. (2010). Attention and the multiple stages of multisensory integration: A review of audiovisual studies. *Acta Psychologica*, 134(3), 372-384. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2010.03.010>
- Kok, P., & de Lange, F. P. (2015). Predictive Coding in Sensory Cortex. In B. U. Forstmann & E.-J. Wagenmakers (Éds.), *An Introduction to Model-Based Cognitive Neuroscience* (p. 221-244). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2236-9_11
- Kondo, H. M., & Lin, I.-F. (2020). Excitation-inhibition balance and auditory multistable perception are correlated with autistic traits and schizotypy in a non-clinical population. *Scientific Reports*, 10(1), 8171. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65126-6>
- Kovarski, K., Malvy, J., Khanna, R. K., Arsène, S., Batty, M., & Latinus, M. (2019). Reduced visual evoked potential amplitude in autism spectrum disorder, a variability effect? *Translational Psychiatry*, 9, 341. <https://doi.org/10.1038/s41398-019-0672-6>
- Kovarski, K., Thillay, A., Houy-Durand, E., Roux, S., Bidet-Caulet, A., Bonnet-Brilhault, F., & Batty, M. (2016). Brief Report: Early VEPs to Pattern-Reversal in Adolescents and Adults with Autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 46(10), 3377-3386. <https://doi.org/10.1007/s10803-016-2880-8>
- Kröger, A., Bletsch, A., Krick, C., Siniatchkin, M., Jarczok, T. A., Freitag, C. M., & Bender, S. (2014). Visual event-related potentials to biological motion stimuli in autism spectrum disorders. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 9(8), 1214-1222. <https://doi.org/10.1093/scan/nst103>
- Latinus, M., Mofid, Y., Kovarski, K., Charpentier, J., Batty, M., & Bonnet-Brilhault, F. (2019). Atypical Sound Perception in ASD Explained by Inter-Trial (In)consistency in EEG. *Frontiers in Psychology*, 10. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2019.01177>
- Leekam, S. R., Nieto, C., Libby, S. J., Wing, L., & Gould, J. (2007). Describing the sensory abnormalities of children and adults with autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 37(5), 894-910. <https://doi.org/10.1007/s10803-006-0218-7>
- Lehmann, D., Gevins, A. S., & Remond, A. (1987). Handbook of electroencephalography and clinical neurophysiology. In *Methods of analysis of brain electrical and magnetic signals* (Vol. 1).
- Lehmann, D., & Skrandies, W. (1980). Reference-free identification of components of checkerboard-evoked multichannel potential fields. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 48(6), 609-621. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(80\)90419-8](https://doi.org/10.1016/0013-4694(80)90419-8)
- Lincoln, A. J., Courchesne, E., Harms, L., & Allen, M. (1995). Sensory modulation of auditory stimuli in children with autism and receptive developmental language disorder: Event-related brain potential evidence. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 25(5), 521-539. <https://doi.org/10.1007/BF02178298>
- Luck, S. J. (2014). *An Introduction to the Event-Related Potential Technique*. The MIT Press.
- Luck, S. J., Woodman, G. F., & Vogel, E. K. (2000). Event-related potential studies of attention. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(11), 432-440. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01545-X](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01545-X)
- M Schaller, U., & Rauh, R. (2017). What Difference Does It Make? Implicit, Explicit and Complex Social Cognition in Autism Spectrum Disorders. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 47(4), 961-979. <https://doi.org/10.1007/s10803-016-3008-x>
- Maekawa, T., Tobimatsu, S., Inada, N., Oribe, N., Onitsuka, T., Kanba, S., & Kamio, Y. (2011). Top-down and bottom-up visual information processing of non-social stimuli in high-functioning autism spectrum disorder. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 5(1), 201-209. <https://doi.org/10.1016/j.rasd.2010.03.012>
- Maier, J. X., Chandrasekaran, C., & Ghazanfar, A. A. (2008). Integration of Bimodal Looming Signals through Neuronal Coherence in the Temporal Lobe. *Current Biology*, 18(13), 963-968. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2008.05.043>
- Mangun, G. R., & Hillyard, S. A. (1991). Modulations of sensory-evoked brain potentials indicate changes in perceptual processing during visual-spatial priming. *Journal of Experimental*

- Psychology. *Human Perception and Performance*, 17(4), 1057-1074. <https://doi.org/10.1037//0096-1523.17.4.1057>
- Marco, E. J., Hinkley, L. B. N., Hill, S. S., & Nagarajan, S. S. (2011). Sensory Processing in Autism : A Review of Neurophysiologic Findings: *Pediatric Research*, 69(5 Part 2), 48R-54R. <https://doi.org/10.1203/PDR.0b013e3182130c54>
- Martineau, J., Garreau, B., Barthelemy, C., & Lelord, G. (1984). Evoked potentials and P300 during sensory conditioning in autistic children. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 425, 362-369. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1984.tb23557.x>
- Mayer, J. L. (2017). The Relationship Between Autistic Traits and Atypical Sensory Functioning in Neurotypical and ASD Adults : A Spectrum Approach. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 47(2), 316-327. <https://doi.org/10.1007/s10803-016-2948-5>
- Mechelli, A., Price, C. J., Friston, K. J., & Ishai, A. (2004). Where Bottom-up Meets Top-down : Neuronal Interactions during Perception and Imagery. *Cerebral Cortex*, 14(11), 1256-1265. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhh087>
- Miller, J. (1982). Divided attention : Evidence for coactivation with redundant signals. *Cognitive Psychology*, 14(2), 247-279. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(82\)90010-X](https://doi.org/10.1016/0010-0285(82)90010-X)
- Milne, E., Scope, A., Pascalis, O., Buckley, D., & Makeig, S. (2009). Independent Component Analysis Reveals Atypical Electroencephalographic Activity During Visual Perception in Individuals with Autism. *Biological Psychiatry*, 65(1), 22-30. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2008.07.017>
- Molholm, S., Murphy, J. W., Bates, J., Ridgway, E. M., & Foxe, J. J. (2020). Multisensory Audiovisual Processing in Children With a Sensory Processing Disorder (I) : Behavioral and Electrophysiological Indices Under Speeded Response Conditions. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 14, 4. <https://doi.org/10.3389/fnint.2020.00004>
- Mottron, L., & Burack, J. (Éds.). (2001). Enhanced Perceptual Functioning in the Development of Autism. In *The Development of Autism* (0 éd., p. 136-151). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781410600196-14>
- Mottron, L., Dawson, M., Soulières, 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. <https://doi.org/10.1007/s10803-005-0040-7>
- Murray, M. M., Brunet, D., & Michel, C. M. (2008). Topographic ERP Analyses : A Step-by-Step Tutorial Review. *Brain Topography*, 20(4), 249-264. <https://doi.org/10.1007/s10548-008-0054-5>
- Nakamura, K., Toshima, T., & Takemura, I. (1986). The comparative and developmental study of auditory information processing in autistic adults. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 16(2), 105-118. <https://doi.org/10.1007/BF01531723>
- Neuhoff, J. G. (1998). Perceptual bias for rising tones. *Nature*, 395(6698), 123-124. <https://doi.org/10.1038/25862>
- Neuhoff, J. G. (2001). An Adaptive Bias in the Perception of Looming Auditory Motion. *Ecological Psychology*, 13(2), 87-110. https://doi.org/10.1207/S15326969ECO1302_2
- Novick, B., Vaughan, H. G., Kurtzberg, D., & Simson, R. (1980). An electrophysiologic indication of auditory processing defects in autism. *Psychiatry Research*, 3(1), 107-114. [https://doi.org/10.1016/0165-1781\(80\)90052-9](https://doi.org/10.1016/0165-1781(80)90052-9)
- Oades, R. D., Walker, M. K., Geffen, L. B., & Stern, L. M. (1988). Event-related potentials in autistic and healthy children on an auditory choice reaction time task. *International Journal of Psychophysiology*, 6(1), 25-37. [https://doi.org/10.1016/0167-8760\(88\)90032-3](https://doi.org/10.1016/0167-8760(88)90032-3)
- O'Connor, K. (2012). Auditory processing in autism spectrum disorder : A review. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 36(2), 836-854. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.11.008>
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness : The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97-113. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(71\)90067-4](https://doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4)
- Orekhova, E. V., Stroganova, T. A., Prokofiev, A. O., Nygren, G., Gillberg, C., & Elam, M. (2009). The right hemisphere fails to respond to temporal novelty in autism : Evidence from an ERP study. *Clinical Neurophysiology: Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 120(3), 520-529. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2008.12.034>

- Orm, S., Holmberg, E. H., Harris, P. L., Nunez, M., & Pons, F. (2021). Diachronic Tendency and Thinking Style Across the Broader Autism Spectrum : Sources of Individual Differences? *Advances in Neurodevelopmental Disorders*, 5(3), 326-338. <https://doi.org/10.1007/s41252-021-00209-7>
- Ozsivadjian, A., Hollocks, M. J., Southcott, J., Absoud, M., & Holmes, E. (2017). Anxious Imagery in Children With and Without Autism Spectrum Disorder : An Investigation into Occurrence, Content, Features and Implications for Therapy. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 47(12), 3822-3832. <https://doi.org/10.1007/s10803-016-2840-3>
- Paul, R., & Cohen, D. J. (1985). Comprehension of indirect requests in adults with autistic disorders and mental retardation. *Journal of Speech and Hearing Research*, 28(4), 475-479. <https://doi.org/10.1044/jshr.2804.475>
- Pei, F., Baldassi, S., & Norcia, A. M. (2014). Electrophysiological measures of low-level vision reveal spatial processing deficits and hemispheric asymmetry in autism spectrum disorder. *Journal of Vision*, 14(11), 3. <https://doi.org/10.1167/14.11.3>
- Pellicano, E., & Burr, D. (2012). When the world becomes 'too real' : A Bayesian explanation of autistic perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(10), 504-510. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.08.009>
- Perrault, N., & Picton, T. W. (1984). Event-related potentials recorded from the scalp and nasopharynx : II. N2, P3 and slow wave. *Electroencephalography & Clinical Neurophysiology: Evoked Potentials*, 59, 261-278. [https://doi.org/10.1016/0168-5597\(84\)90044-3](https://doi.org/10.1016/0168-5597(84)90044-3)
- Perrin, F., Pernier, J., Bertrand, O., Giard, M. H., & Echallier, J. F. (1987). Mapping of scalp potentials by surface spline interpolation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 66(1), 75-81. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(87\)90141-6](https://doi.org/10.1016/0013-4694(87)90141-6)
- Perrin, F., Pernier, J., Bertrand, O., & Echallier, J. F. (1989). Spherical splines for scalp potential and current density mapping. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 72(2), 184-187. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(89\)90180-6](https://doi.org/10.1016/0013-4694(89)90180-6)
- Pion-Tonachini, L., Kreutz-Delgado, K., & Makeig, S. (2019). ICLabel: An automated electroencephalographic independent component classifier, dataset, and website. *NeuroImage*, 198, 181-197. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.05.026>
- Poulain, R., Batty, M., & Cappe, C. (2023). What Makes the Detection of Movement Different within the Autistic Traits Spectrum? Evidence from the Audiovisual Depth Paradigm. *Multisensory research*.
- Powers, A. R., Hillock, A. R., & Wallace, M. T. (2009). Perceptual Training Narrows the Temporal Window of Multisensory Binding. *The Journal of Neuroscience*, 29(39), 12265-12274. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3501-09.2009>
- Robertson, A. E., & Simmons, D. R. (2013). The Relationship between Sensory Sensitivity and Autistic Traits in the General Population. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 43(4), 775-784. <https://doi.org/10.1007/s10803-012-1608-7>
- Robertson, C. E., & Baron-Cohen, S. (2017). Sensory perception in autism. *Nature Reviews. Neuroscience*, 18(11), 671-684. <https://doi.org/10.1038/nrn.2017.112>
- Rogers, S. J., & Ozonoff, S. (2005). Annotation : What do we know about sensory dysfunction in autism? A critical review of the empirical evidence. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 46(12), 1255-1268. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2005.01431.x>
- Rosenhall, U., Nordin, V., Sandström, M., Ahlsén, G., & Gillberg, C. (1999). Autism and hearing loss. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 29(5), 349-357. <https://doi.org/10.1023/a:1023022709710>
- Rotschafer, S. E. (2021). Auditory Discrimination in Autism Spectrum Disorder. *Frontiers in Neuroscience*, 15, 651209. <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.651209>
- Russo, N., Foxe, J. J., Brandwein, A. B., Altschuler, T., Gomes, H., & Molholm, S. (2010). Multisensory processing in children with autism : High-density electrical mapping of auditory-somatosensory integration. *Autism Research*, 3(5), 253-267. <https://doi.org/10.1002/aur.152>
- Schendan, H., & Ganis, G. (2012). Electrophysiological Potentials Reveal Cortical Mechanisms for Mental Imagery, Mental Simulation, and Grounded (Embodied) Cognition. *Frontiers in Psychology*, 3. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2012.00329>

- Schulz, S., & Stevenson, R. (2020). Distinguishing Sensory Sensitivity and Reactivity, and How They Relate to Autistic Traits. *PsyArXiv*. <https://doi.org/10.31234/osf.io/vhtfk>
- Seri, S., Cerquiglini, A., Pisani, F., & Curatolo, P. (1999). Autism in tuberous sclerosis: Evoked potential evidence for a deficit in auditory sensory processing. *Clinical Neurophysiology: Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 110(10), 1825-1830. [https://doi.org/10.1016/s1388-2457\(99\)00137-6](https://doi.org/10.1016/s1388-2457(99)00137-6)
- Shafer, V. L., Schwartz, R. G., & Martin, B. (2011). Evidence of deficient central speech processing in children with specific language impairment: The T-complex. *Clinical Neurophysiology*, 122(6), 1137-1155. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2010.10.046>
- Sokhadze, E. M., Lamina, E. V., Casanova, E. L., Kelly, D. P., Opris, I., Khachidze, I., & Casanova, M. F. (2017). Atypical Processing of Novel Distracters in a Visual Oddball Task in Autism Spectrum Disorder. *Behavioral Sciences (Basel, Switzerland)*, 7(4), E79. <https://doi.org/10.3390/bs7040079>
- Stefanou, M. E., Dundon, N. M., Bestelmeyer, P. E. G., Ioannou, C., Bender, S., Biscaldi, M., Smyrnis, N., & Klein, C. (2020). Late attentional processes potentially compensate for early perceptual multisensory integration deficits in children with autism: Evidence from evoked potentials. *Scientific Reports*, 10(1), 16157. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73022-2>
- Stein, B. E. (Ed.). (2012). *The New Handbook of Multisensory Processing*. MIT Press.
- Stein, B. E., & Meredith, M. A. (1993). *The merging of the senses*. The MIT Press.
- Stevenson, R. A., Ghose, D., Fister, J. K., Sarko, D. K., Altieri, N. A., Nidiffer, A. R., Kurela, L. R., Siemann, J. K., James, T. W., & Wallace, M. T. (2014). Identifying and Quantifying Multisensory Integration: A Tutorial Review. *Brain Topography*, 27(6), 707-730. <https://doi.org/10.1007/s10548-014-0365-7>
- Stevenson, R. A., Wilson, M. M., Powers, A. R., & Wallace, M. T. (2013). The effects of visual training on multisensory temporal processing. *Experimental brain research. Experimentelle Hirnforschung. Experimentation cerebrale*, 225(4), 479-489. <https://doi.org/10.1007/s00221-012-3387-y>
- Stewart, M. E., & Ota, M. (2008). Lexical effects on speech perception in individuals with “autistic” traits. *Cognition*, 109(1), 157-162. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2008.07.010>
- Stokes, M., Thompson, R., Cusack, R., & Duncan, J. (2009). Top-Down Activation of Shape-Specific Population Codes in Visual Cortex during Mental Imagery. *Journal of Neuroscience*, 29(5), 1565-1572. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4657-08.2009>
- Stroganova, T. A., Kozunov, V. V., Posikera, I. N., Galuta, I. A., Gratchev, V. V., & Orekhova, E. V. (2013). Abnormal Pre-Attentive Arousal in Young Children with Autism Spectrum Disorder Contributes to Their Atypical Auditory Behavior: An ERP Study. *PLoS ONE*, 8(7), e69100. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0069100>
- Sutherland, A., & Crewther, D. P. (2010). Magnocellular visual evoked potential delay with high autism spectrum quotient yields a neural mechanism for altered perception. *Brain*, 133(7), 2089-2097. <https://doi.org/10.1093/brain/awq122>
- Tager-Flusberg, H., Edelson, L., & Luyster, R. (2011). Language and communication in autism spectrum disorders. (Amaral D, Geschwind D, Dawson G, editors. *Autism Spectrum Disorders*. New York, NY: Oxford University Press, pp 172–185).
- Takayama, Y., Hashimoto, R., Tani, M., Kanai, C., Yamada, T., Watanabe, H., Ono, T., Kato, N., & Iwanami, A. (2014). Standardization of the Japanese version of the Glasgow Sensory Questionnaire (GSQ). *Research in Autism Spectrum Disorders*, 8(4), 347-353. <https://doi.org/10.1016/j.rasd.2013.12.017>
- Thye, M. D., Bednarz, H. M., Herringshaw, A. J., Sartin, E. B., & Kana, R. K. (2018). The impact of atypical sensory processing on social impairments in autism spectrum disorder. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 29, 151-167. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2017.04.010>
- Todorova, G. K., Hatton, R. E. M., & Pollick, F. E. (2019). Biological motion perception in autism spectrum disorder: A meta-analysis. *Molecular Autism*, 10(1), 49. <https://doi.org/10.1186/s13229-019-0299-8>
- Tomchek, S. D., & Dunn, W. (2007). Sensory Processing in Children With and Without Autism: A Comparative Study Using the Short Sensory Profile. *The American Journal of Occupational Therapy*, 61(2), 190-200. <https://doi.org/10.5014/ajot.61.2.190>

- van Laarhoven, T., Stekelenburg, J. J., & Vroomen, J. (2019). Increased sub-clinical levels of autistic traits are associated with reduced multisensory integration of audiovisual speech. *Scientific Reports*, 9(1), 9535. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46084-0>
- Vogel, E. K., & Luck, S. J. (2000). The visual N1 component as an index of a discrimination process. *Psychophysiology*, 37(2), 190-203. <https://doi.org/10.1111/1469-8986.3720190>
- von dem Hagen, E. A. H., Stoyanova, R. S., Baron-Cohen, S., & Calder, A. J. (2013). Reduced functional connectivity within and between ‘social’ resting state networks in autism spectrum conditions. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 8(6), 694-701. <https://doi.org/10.1093/scan/nss053>
- Voos, A. C., Pelphrey, K. A., & Kaiser, M. D. (2013). Autistic traits are associated with diminished neural response to affective touch. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 8(4), 378-386. <https://doi.org/10.1093/scan/nss009>
- Wass, S. (2011). Distortions and disconnections : Disrupted brain connectivity in autism. *Brain and Cognition*, 75(1), 18-28. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2010.10.005>
- Williams, Z. J., Abdelmessih, P. G., Key, A. P., & Woynaroski, T. G. (2021). Cortical Auditory Processing of Simple Stimuli Is Altered in Autism: A Meta-analysis of Auditory Evoked Responses. *Biological Psychiatry: Cognitive Neuroscience and Neuroimaging*, 6(8), 767-781. <https://doi.org/10.1016/j.bpsc.2020.09.011>
- Yaguchi, A., & Hidaka, S. (2018). Distinct Autistic Traits Are Differentially Associated With the Width of the Multisensory Temporal Binding Window. *Multisensory Research*, 31(6), 523-536. <https://doi.org/10.1163/22134808-00002612>
- Yamasaki, T., Fujita, T., Ogata, K., Goto, Y., Munetsuna, S., Kamio, Y., & Tobimatsu, S. (2011). Electrophysiological evidence for selective impairment of optic flow perception in autism spectrum disorder. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 5(1), 400-407. <https://doi.org/10.1016/j.rasd.2010.06.002>

3 PARTIE 3 – DISCUSSION GENERALE

3.1 Notion de spectre(s) : entre personnalité et condition clinique

La notion de spectre autistique suppose l'existence d'un continuum sur lequel l'ensemble des individus se caractérise par la quantité de leurs traits autistiques allant des manifestations les plus faibles (au niveau de la population générale) aux manifestations les plus sévères (au niveau du TSA). Cette notion de traits autistiques a été introduite à partir des travaux de Baron-Cohen et al. (2001) qui ont mis en évidence la présence de particularités autistiques sociales, cognitives et comportementales auto-rapportées à partir du score à l'AQ dans la population générale, jusqu'à un score seuil à partir duquel nous retrouvons les sujets TSA. L'objectif de cette thèse était de caractériser l'intégration multisensorielle de mouvements en profondeur le long du spectre autistique. Nous nous attendions à une expression linéaire des particularités sensorielles selon le niveau de traits autistiques de l'individu. Finalement, nos résultats ont mis en évidence une forme de rupture du spectre, les sujets TSA ayant présenté un pattern de réponses comportementales davantage similaire aux sujets ayant des traits autistiques faibles. En ce sens, et selon Sasson & Bottema-Beutel (2022), la mesure dans laquelle les traits autistiques dans la population générale se répliquent dans le TSA demeure confuse.

Une telle absence de linéarité dans nos résultats pourrait être la conséquence de l'utilisation d'outils inadaptés pour évaluer les traits autistiques et/ou d'une réelle rupture au sein du continuum autistique remettant en question le modèle dimensionnel dans le TSA.

D'une part, les questionnaires évaluant les traits autistiques ne nécessitent aucun jugement clinique, ne sont pas conçus comme des évaluations diagnostiques, reposent sur de l'auto-évaluation et contiennent des éléments qui sont souvent interprétés différemment par les individus TSA et non-TSA (Gernsbacher et al., 2017). Cela remet en question la façon de concevoir l'outil AQ, qui ne permet pas de dresser un profil autistique complet de l'individu mais permettrait plutôt d'en saisir le fonctionnement général. Relevons que ce « fonctionnement général » est évalué à partir de domaines de la triade des symptômes autistiques du DSM-IV datant de 1994 (APA, 1994 ; Rutter, 1978 ; Wing & Gould, 1979), ainsi que parmi les domaines de difficultés cognitives démontrées dans le TSA avant l'année 2000. Ce constat questionne sur la validité de l'outil étant donné l'évolution des critères diagnostiques et plus largement, de l'ensemble des données expérimentales sur le TSA (APA, 2013). En effet, l'AQ n'a pas été développé sur les critères diagnostiques du TSA mais sur ceux du syndrome d'Asperger et ne prend pas en compte le fonctionnement sensoriel de l'individu, marquant ainsi le caractère incomplet de l'outil pour dresser un profil autistique. De plus, afin d'évaluer le

profil autistique des individus, il est recommandé (HAS, 2011, 2018) d'utiliser d'autres outils en complément du AQ, tel que le *Social Responsiveness Scale* (SRS-2 ; Constantino, 2012). L'échelle du SRS-2 semble effectivement intéressante puisqu'elle permet une évaluation approfondie du fonctionnement social à partir des critères diagnostiques DSM-5. En alternative à l'AQ, l'usage du *Ritvo Autism Asperger Diagnostic Scale-Revised* (Ritvo et al., 2011) pourrait être considéré étant donné que cet outil basé sur le DSM-V évalue en plus le fonctionnement sensori-moteur des participants et prend en compte les habiletés de camouflage des difficultés sociales. Afin de dresser un profil autistique plus complet de l'individu, l'utilisation de l'échelle d'Evaluation des Comportements Répétitifs et Restreints (EC2R ; Bourreau et al., 2005) qui évalue spécifiquement les comportements inadaptés propres au TSA pourrait également être envisagée.

D'autre part, les scores au questionnaire pourraient refléter des niveaux de sévérité distincts dans la population générale et dans le TSA. Ainsi, le passage de la subclinique (trait de personnalité) à la clinique (TSA) pourrait être marqué d'une rupture qui, bien que ne pouvant pas s'observer clairement sur la base de scores à des questionnaires, se révèlent lorsque des mesures comportementales ou neurophysiologiques y sont associées. Puisque l'expression linéaire des particularités autistiques est substantielle au continuum autistique, la notion de rupture pourrait remettre en question l'existence de ce continuum et en conséquence, de l'application du modèle dimensionnel au TSA. Une alternative à la remise en question totale de l'existence des traits de personnalité autistique est la proposition de modèles alternatifs au modèle dimensionnel. Si nous ouvrons notre littérature aux autres traits de personnalité, nous nous apercevons que des modèles alternatifs au modèle dimensionnel dans l'étude des traits de personnalité et du trouble en question ont été développés, tel que c'est le cas de la schizophrénie (et personnalité schizotypique). Meehl (1990) a proposé un modèle quasi-dimensionnel avec l'hypothèse que la schizotypie (ou ici, la personnalité autistique) et la schizophrénie (ou ici, le TSA) seraient sous-tendues par une anomalie génétique, probablement en interaction avec certains facteurs environnementaux. Cela signifie qu'il est possible d'évaluer les traits de personnalité autistique de tout individu non-TSA mais que si nous voulons considérer l'individu au sein du continuum autistique, il doit présenter l'anomalie génétique similaire aux sujets TSA. Cette notion de génétique dans le TSA et la personnalité autistique fait largement écho aux toutes premières évaluations autistiques de sujets non-TSA qui s'étaient focalisées chez la famille des sujets TSA et qui avaient introduit le concept de *broader autism phenotype* (voir section 1.1.2). Notons que cette approche quasi-dimensionnelle reste encore largement discutée

dans la schizophrénie puisqu'aucun « schizogène » n'a encore été identifié et que le nombre de gènes candidats reste important (Grant, 2015).

Au-delà de l'approche quasi-dimensionnelle, Chisholm et al. (2015) propose d'autres modèles qui questionnent sur l'étiologie de la personnalité autistique et du TSA. Les modèles proposés par Chisholm et al. (2015) rendent compte des relations possibles entre deux pathologies, qu'ici nous tentons d'appliquer entre le TSA et la personnalité autistique. Le modèle de multiformité proposerait que la personnalité autistique et le TSA représentent différentes manifestations d'une cause commune sous-jacente. Ainsi, bien que le TSA et la personnalité autistique pourraient à la fois avoir des similitudes et des expressions différentes selon la dimension évaluée, ils partageraient la même origine. Le modèle à chevauchement étiologique proposerait que le TSA et la personnalité autistique partagent certaines voies étiologiques, tandis que d'autres voies causales restent spécifiques au TSA et à la personnalité autistique (voir Figure 35). La validité conceptuelle des traits autistiques demeure néanmoins incertaine et la pertinence de mesurer les traits autistiques chez les individus non-TSA nécessite une exploration plus approfondie ainsi que la proposition de modèles alternatifs au modèle dimensionnel que nous avons tenté ici d'introduire.

Une caractérisation de l'étiologie du TSA répondrait à la question de la pertinence de la personnalité autistique car il *suffirait* d'évaluer dans quelle mesure cette étiologie s'exprime selon le niveau de personnalité autistique. Avant d'arriver à cette avancée scientifique majeure, pensons à explorer la part du biologique, du psychologique et du social dans l'émergence de la personnalité autistique au sein de la population générale. En effet, des travaux récents ont mis en évidence que la privation sociale conduit au développement de comportements inadaptés ainsi qu'à des caractéristiques neuro-anatomiques et neurochimiques qui sont similaires à ceux retrouvés dans le TSA. Idéalement, une étude longitudinale évaluant régulièrement le fonctionnement d'individus TSA et non-TSA permettrait de faire la part entre l'acquis et l'inné concernant la personnalité autistique. Nous savons que le TSA est un trouble du neurodéveloppement, autrement dit un développement cérébral atypique qui conduit à l'ensemble de la symptomatologie autistique. L'idée ici est de vérifier que la personnalité autistique partage des origines communes neurofonctionnelles et neuro-anatomiques avec les sujets TSA et qu'elle n'est pas complètement issue de facteurs sociaux, environnementaux et/ou psychologiques. Il est aisément envisageable qu'un individu non-TSA présente des particularités autistiques (i.e., éviter le contact social, présenter des comportements répétitifs) en conséquence d'événements de vie. La gémellologie permettrait également de caractériser la part de l'acquis et de l'inné concernant le niveau de particularités autistiques chez les individus

TSA et non-TSA. Chez des individus partageant un tableau génétique et un fonctionnement cérébral similaire, l'idée ici est de déterminer dans quelle mesure l'expérience va influencer l'émergence et/ou la variation de la personnalité autistique. Si les résultats vont plutôt en faveur du modèle à chevauchement étiologique, la lexicologie remettrait en question même l'expression de « personnalité autistique ».

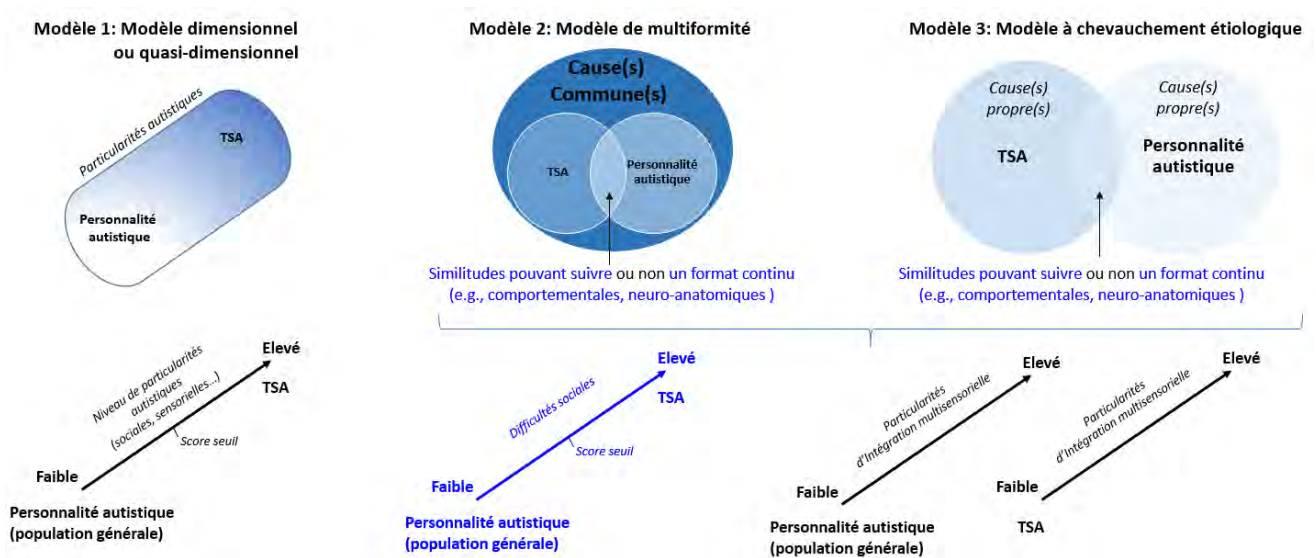


Figure 35. Proposition de modèles inspirés de la littérature pour comprendre la relation entre le TSA et la personnalité autistique.

3.2 Le lien entre fonctionnement sensoriel et social

Du sensoriel au social

Nos résultats ont montré que les individus non-TSA manifestant des particularités autistiques élevées (telles qu'évaluées avec le score à l'AQ), présentent des hyperréactivités face au mouvement en profondeur. Par ailleurs, notre étude 2 a mis en évidence une facilitation multisensorielle dans la condition en éloignement uniquement dans le groupe AQ+ et TSA, qui pourrait être sous-tendue dans l'étude 3 pour le groupe AQ+ par des réponses multisensorielles précoces au niveau pariéto-occipital. Des atypies au niveau des aires sensorielles sont également largement proposées dans le TSA (Robertson & Baron-Cohen, 2017; Thyé et al., 2018). Ainsi, l'hypothèse d'une étiologie commune basée sur le développement atypique des aires sensorielles pourrait être envisagée. Le projet initial de thèse prévoyait une partie d'analyse des réponses EEG de sujets TSA dont le recrutement est toujours en cours. L'analyse des réponses de ces sujets TSA contribueront à tester cette hypothèse.

Les résultats de la présente thèse mettent en évidence un lien entre le fonctionnement sensoriel et autistique. Ce lien nous semble particulièrement intéressant à explorer plus encore au vue des théories émergentes concernant l'impact du fonctionnement sensoriel sur le développement des difficultés liées au TSA, notamment sociales. En ce sens, une étude complémentaire en ligne est en cours. Celle-ci a pour objectif de caractériser la part du sensoriel dans le développement des difficultés sociales et plus globalement, des traits autistiques. Nous recrutons des sujets TSA, des sujets avec un trouble sensoriel (malentendance, malvoyance, photophobie, hyperacousie) ainsi que des sujets contrôles (sans TSA ni trouble sensoriel) et leur présentons des questionnaires en ligne qui évaluent les traits autistiques (AQ), le profil sensoriel (AASP) et le fonctionnement social (RECS). Nous testerons si les sujets avec un trouble sensoriel présentent un profil autistique et des difficultés sociales similaires aux sujets TSA. Puisque nous recrutons des sujets ayant entre 11 et 55 ans, l'aspect développemental sera investigué en considérant l'âge des participants dans les analyses.

Par ailleurs, en considérant le retentissement du fonctionnement sensoriel, notamment de la sensibilité sensorielle, sur les réponses comportementales et neurophysiologiques tel que proposé dans nos études, de futurs travaux pourraient considérer l'impact du fonctionnement sensoriel sur les réponses des participants. Lors de l'évaluation diagnostique du TSA, il est recommandé (HAS, 2018) de systématiser la mise en place d'examen auditifs et visuels qui pourraient renseigner les seuils de perception et de discrimination dans de telles modalités sensorielles. Ces informations pourraient à l'avenir constituer des indices précieux pour la

recherche, enrichir l'interprétation des résultats et permettraient d'œuvrer collectivement vers une compréhension de la place du sensoriel sur le fonctionnement général de l'individu.

En outre, une des questions ici est de savoir si les réponses des sujets AQ+ et TSA mises en évidence dans le travail de cette thèse sont spécifiques au mouvement en profondeur ou si elles concernent tout type de mouvement. En effet, notre intérêt de travailler avec des stimuli en mouvement de profondeur était notamment motivé par l'implication d'un tel mouvement dans les interactions sociales, dans lesquelles une personne s'approche d'une autre pour interagir ou évite le contact social en s'éloignant des autres. Dans cette perspective, évaluer les capacités de détection de différents mouvements (translationnel, rotationnel, en profondeur) dont des informations statiques, seraient particulièrement intéressant. Les temps de réaction pourraient être ainsi comparés entre les différentes conditions de mouvement afin d'explorer si les capacités d'IMS des groupes AQ+ et TSA sont spécifiques au mouvement en profondeur. Cela permettra également de tester si les TR du groupe AQ+ sont spécifiquement plus courts pour le mouvement en profondeur (et particulièrement le mouvement en approche) et si une rupture du continuum est également observée pour les autres conditions de mouvement.

Du social au sensoriel

Par ailleurs, un autre point de vue que celui largement investi dans le travail de cette thèse serait que les difficultés sociales pourraient affecter les processus sensoriels dits de bas niveau, tels que l'IMS d'informations simples et non sociales. Confrontés à des difficultés d'intégration de stimuli sociaux multisensoriels, les individus présentant un TSA ou une personnalité autistique élevée pourraient mettre en place des comportements d'orientation préférentiels pour entraîner leurs processus d'intégration. Des effets d'apprentissage sur l'IMS ont été démontrés chez des sujets non-TSA, suggérant que l'IMS est plastique et modulable en fonction de l'expérience sensorielle individuelle (Juan et al., 2017; Powers et al., 2009; Stevenson et al., 2013). De plus, les stades tardifs de l'IMS seraient directement influencés par le niveau d'attention (Koelewijn et al., 2010). Ainsi, l'IMS pourrait résulter d'un apprentissage sensoriel, ayant généré des orientations volontaires et spécifiques pour les stimuli multisensoriels qui sont essentiels dans notre environnement social et non social. Cela implique un rôle actif des individus dans leur apprentissage sensoriel, ce qui est particulièrement intéressant dans le cadre des interventions sensorielles dans le TSA. Il pourrait être intéressant de considérer les préférences sensorielles des individus TSA (observer/interroger les orientations volontaires) pour enrichir ces remédiations sensorielles. Mettre en place des études longitudinales serait crucial pour étudier le développement de l'IMS dans le spectre autistique.

3.3 Espace péripersonnel et mouvement en profondeur dans le TSA

Le mouvement en approche et en éloignement est particulièrement important dans la définition de l'espace péripersonnel (*peripersonal space* ; PPS), qui est le rayon entourant immédiatement le corps dans lequel les stimuli sont perçus comme physiquement pertinents (Brozzoli et al., 2009). La taille de ce PPS varie en fonction de la partie du corps stimulée, de la position du corps dans l'espace et du sens du mouvement des stimuli (par exemple, le PPS s'élargit pour du mouvement en approche ; voir la revue de Cléry & Ben Hamed, 2018 ; voir Figure 36A). Kennedy et al. (2015) ont suggéré que les participants TSA ne respectent pas l'espace péripersonnel des autres participants et que certains de ces participants TSA ne présentaient pas du tout cet espace péripersonnel. Plus concrètement, en utilisant le *stop-distance paradigm* (signaler la distance à laquelle le participant souhaite qu'une personne s'approchant ou s'éloignant s'arrête ; voir Figure 36B), les participants TSA ne se sont jamais arrêtés et n'ont jamais indiqué à l'autre individu d'arrêter de les approcher. A partir d'un environnement virtuel, Parsons et al. (2004) ont constaté que les participants TSA se heurtaient davantage aux personnages virtuels lors d'explorations libres par rapport aux contrôles. D'autres travaux ont retrouvé des différences de valeurs de PPS entre les participants TSA et non-TSA évaluées à partir de personnes s'approchant/s'éloignant (e.g., Asada et al., 2016). Les travaux de Gessaroli et al. (2013) ont par ailleurs mis en évidence une inflexibilité du PPS chez les sujets TSA, pour lesquels, suite à des interactions sociales, le PPS ne s'est pas modulé alors qu'il a rétréci chez les sujets contrôles, offrant davantage de proximité avec l'interlocuteur. L'ensemble de ces résultats met ainsi en évidence un PPS atypique dans le TSA qui serait rigide, inflexible au contexte. Nous souhaitons ajouter que les réponses des sujets TSA dans ces études ayant utilisé le *stop-distance paradigm* ont pu être impactées par l'estimation *time-to-contact*, estimation du sujet concernant le moment où la cible va l'impacter, qui reste encore à être étudiée dans le TSA (Casassus et al., 2019). Par ailleurs, rappelons-nous que l'hypothèse du Désordre du Traitement Temporo-Spatial des flux multisensoriels (Gepner & Féron, 2009) suggère que les individus TSA présenteraient des difficultés à traiter en temps réel les stimuli multisensoriels dynamiques qui constituent notre environnement, à les associer en schémas significatifs et cohérents et à produire des ajustements sensori-moteurs ainsi que des réponses verbales et non verbales adaptées. Plusieurs travaux ont mis en évidence une perception nettement améliorée lorsque la vitesse de présentation des stimuli est ralentie dans des tâches complexes et sociales (catégorisation phonémique, Tardif et al., 2002; en reconnaissance et imitations d'expressions faciales, Lainé et al., 2008; Tardif et al., 2007). Il serait particulièrement intéressant d'investir

le *stop-distance paradigm* et faire varier le mouvement à différentes vitesses. L'idée ici étant que le PPS des sujets TSA se normaliserait lors de l'utilisation de la vitesse lente.

Notons également que l'intégration multisensorielle est particulièrement importante dans la modulation du PPS. Les entrées convergentes du toucher, de la vision, de l'audition et de la proprioception spécifient l'emplacement et les limites du corps dans l'environnement. Les propriétés spatiales de ces informations multisensorielles provenant de soi ou de l'extérieur sont essentielles dans l'interprétation et la mise en place de comportements adaptés. Elles permettent par exemple, d'évaluer à la fois comment et quand mettre en œuvre des programmes moteurs en réponse à des événements environnementaux se produisant à proximité ou à l'approche de son corps, ainsi que le potentiel de menace ou de récompense résultant de ces interactions. Dans la littérature, le paradigme utilisé pour évaluer l'interaction entre le PPS et l'intégration multisensorielle implique la présentation d'une stimulation tactile associée à des stimuli visuels en approche ou en éloignement (Brozzoli et al., 2009; Hunley & Lourenco, 2018). Noel et al. (2020) ont appliqué ce paradigme chez des sujets TSA et ont retrouvé un PPS réduit et rigide dans le TSA et cela en utilisant des stimuli simples et non-sociaux (voir Figure 36C). Dans notre tâche de détection de mouvements en approche et en éloignement, les sujets TSA ont manifesté des temps de réaction plus courts en condition audiovisuelle ainsi que des indices plus importants d'IMS relativement aux AQ-. La notion de PPS au sein de nos études est pertinente puisque l'écran qui affichait les stimuli, était relativement proche des participants (~80 cm des yeux mais beaucoup plus proche de la main des participants, qui était posée devant eux afin de répondre à la tâche). Il n'est pas impossible que les réponses des participants aient été influencées par ces notions d'interface entre le PPS et l'IMS qui serait particulièrement intéressante à développer. En outre, nous nous demandons dans quelle mesure l'interaction PPS/IMS a pu influencer les réponses des sujets AQ+, qui ont présenté une hyperréactivité pour du mouvement en profondeur.

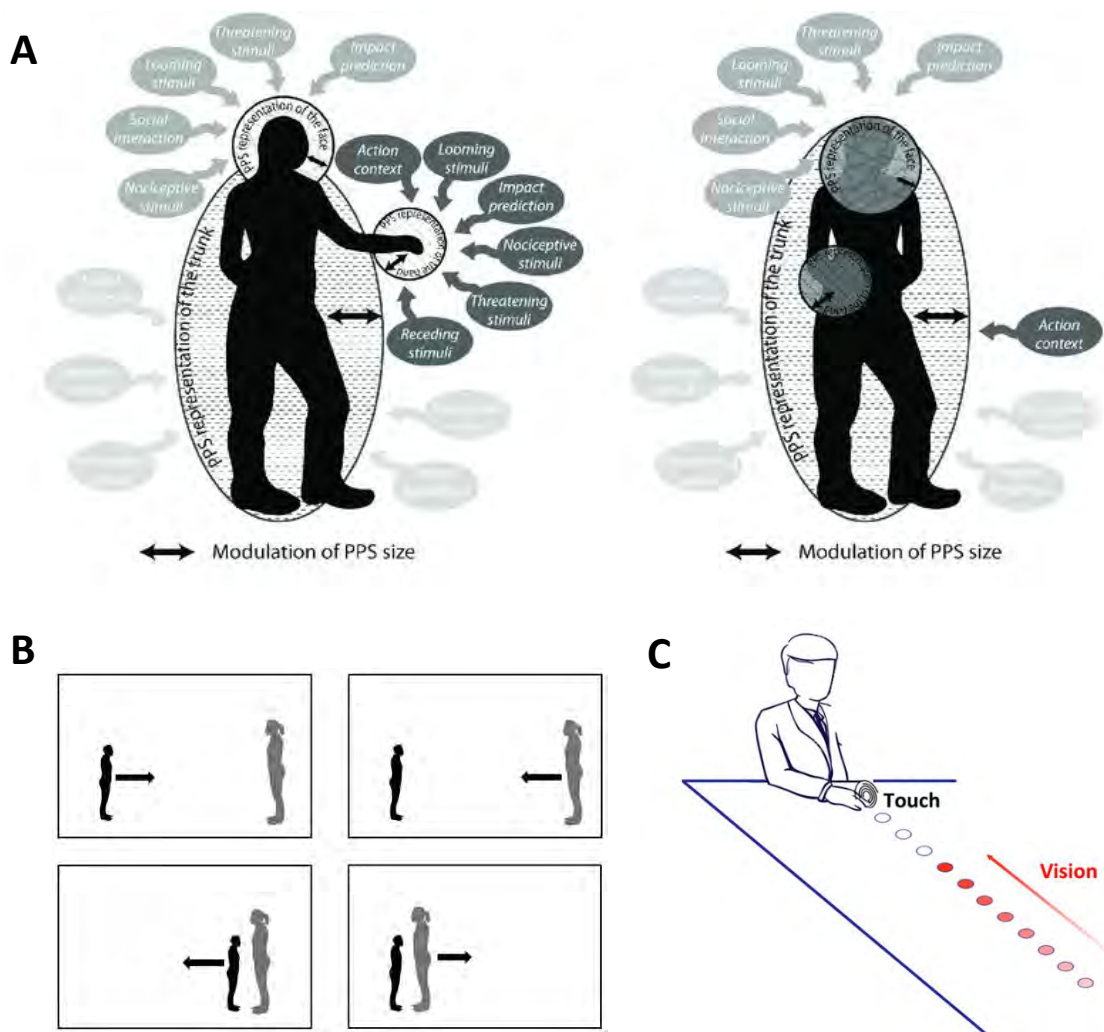


Figure 36. (A) A gauche : La représentation de l'espace péripersonnel est modulée par de nombreux facteurs tels que la perception de mouvement en approche, des facteurs sociaux ou émotionnels. Il existe au moins quatre sous-représentations du PPS : le tronc, le visage, les mains et les membres inférieurs. A droite : Ces représentations peuvent fusionner en fonction de leur distance relative au tronc. Issue de *Cléry & Ben Hamed (2018)*. (B) Illustration du *stop-distance paradigm* dans lequel le participant (en noir) signale le moment où de l'inconfort est ressenti lorsque le participant approche un individu ou que l'individu approche le participant (en haut de l'illustration). Lorsque du mouvement en éloignement est utilisé, le participant indique la distance à laquelle il se sent le mieux (en bas de l'illustration. Issue de *Gessaroli et al. (2013)*. (C) Etude de l'interaction entre le PPS et l'intégration multisensorielle visuo-tactile réalisée dans le TSA. Issue de *Noel et al. (2020)*

3.4 Remédiation temporo-spatiale de l'information multisensorielle dans le TSA

L'ensemble des participants, y compris les TSA, ont présenté globalement des temps de réaction plus courts dans les conditions de vitesse rapide et plus particulièrement dans la condition multisensorielle à vitesse rapide. Ce qui suggère que dans des tâches simples de détection, investissant du contenu simple et non-social, les sujets TSA ne présenteraient pas de difficultés notables dans le traitement temporo-spatial de l'information unisensorielle et dans l'intégration de l'information multisensorielle. A l'inverse, lors d'utilisation de tâches sociales complexes (e.g., reconnaissance des émotions, imitation de comportements sociaux), une amélioration de la réponse en condition de vitesse lente est communément observée. Il est possible que les désordres temporeux et spatiaux des flux multisensoriels à l'origine des difficultés des sujets TSA, tels que proposés par Gepner & Féron (2009), ne s'appliquent que dans des contextes à forte demande perceptuelle et/ou exécutive telle que c'est le cas au sein de situations sociales. Dans le domaine purement temporel de l'IMS, l'une des découvertes les plus robustes dans le TSA est une acuité temporelle multisensorielle plus faible, i.e., un élargissement de leur *temporal binding window* (TBW ; voir la revue de Wallace & Stevenson, 2014). Les participants TSA perçoivent les stimuli comme étant multisensoriels, provenant du même événement, sur des intervalles de temps plus longs que les participants contrôles (c'est-à-dire qu'ils signalent la simultanéité même lorsque les stimuli sont sensiblement asynchrones). Une équipe de recherche a mis en évidence l'aspect plastique et malléable de cette fenêtre chez des sujets non-TSA, offrant la perspective d'une amélioration de celle-ci dans le TSA. Plus concrètement, sur la base d'un entraînement de 5 h (1 h par jour) au cours duquel les participants ont effectué une tâche de jugement de simultanéité, les individus ont présenté une réduction de la largeur de cette fenêtre (Powers et al., 2009; Stevenson et al., 2013; voir Figure 37). Le plus encourageant dans ces études, dans l'idée d'étendre ces entraînements dans le TSA, est que ceux qui ont le plus bénéficié de l'entraînement (c'est-à-dire qui ont montré les plus grands changements dans la taille de cette fenêtre) étaient ceux pour lesquels la fenêtre était la plus large avant les sessions d'entraînement. Enrichir les remédiations perceptuelles déjà en place, de visionnage de vidéo à contenu social en vitesse lente avec des entraînements de la fenêtre d'IMS pourraient être envisagés. L'idée ici serait dans un premier temps d'entraîner l'aspect purement temporel de l'IMS à partir de stimuli simples et non-sociaux (e.g., à partir de flash et de beep sonores) puis de progresser vers des stimuli sociaux (e.g., visages et voix) et dans un second temps entraîner la composante spatiotemporelle par du visionnage de vidéos à contenu social, tel qu'initialement proposé par de Gepner & Féron (2009). Le bénéfice de l'ajout de

l'entraînement de la fenêtre d'IMS dans ces remédiations perceptuelles est encore purement hypothétique car le bénéfice d'un tel entraînement reste encore à être démontré dans le TSA. En outre, il resterait encore à mettre en évidence un bénéfice dans le monde réel, telles que l'amélioration des compétences sociales et de la communication.

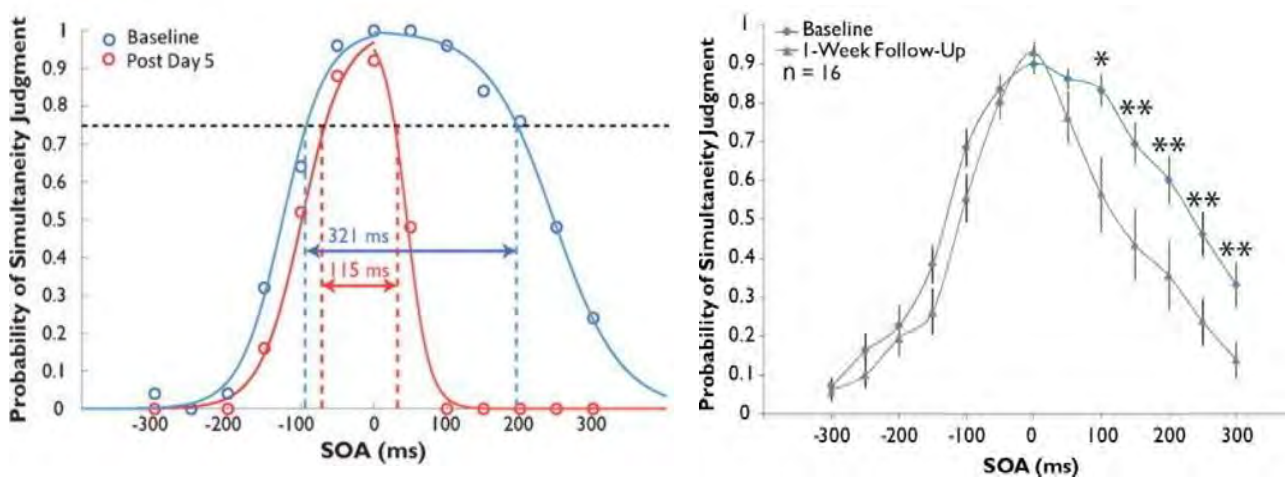


Figure 37. Effet de l'entraînement sur les caractéristiques de la fenêtre d'IMS. Sur l'axe des Y : nombre de fois où les informations visuelles et auditives ont été perçues comme simultanées (en %) selon différentes valeurs d'asynchronie de présentation (SOA). Les valeurs positives de SOA sur l'axe des X signifient qu'un stimulus visuel a été présenté en premier, alors qu'il s'agit d'un stimulus auditif pour les valeurs négatives. A gauche : la fenêtre des participants initiales (en bleu) relativement à la fenêtre après 5 jours d'entraînement (en rouge). A droite : Une évaluation de suivi concernant les effets de l'entraînement de la fenêtre à une semaine montre un maintien de ceux-là. Issue de Powers et al., 2009.

3.5 Limites et perspectives

Pour traiter de la question de l'IMS de mouvements en profondeur dans le continuum autistique, des choix ont été faits qui ont privilégié certains axes d'investigation et certaines méthodes expérimentales. Une conséquence de ces choix est que d'autres potentialités ont été ignorées, conférant un caractère limité à certains de nos éléments de discussion ou d'interprétation

En premier lieu, dans l'idée d'analyser la personnalité autistique par groupe (AQ- et AQ+), une méthode à privilégier aurait été de diffuser le questionnaire AQ sur un échantillon large d'individus et de prendre les valeurs extrêmes ne dépassant pas le score seuil du TSA. Cela aurait augmenté notre coefficient de variation du score au questionnaire et aurait été plus adapté dans la comparaison intergroupe. Puisque les coefficients de variation au AQ correspondent à 43% pour l'étude 1 comportementale et 34% pour l'étude 3 neurophysiologique, il est possible que nos résultats en aient été affectés. Pour revenir sur la notion de score seuil du AQ, Baron-Cohen et al. (2001) avaient suggéré qu'un score supérieur à 32 au AQ permettrait de distinguer les individus qui présentent des niveaux cliniquement significatifs de traits autistiques. Ainsi, il a été envisagé l'exclusion des participants non-TSA au-dessus de ce seuil ($n = 2$) dans l'étude 1 et 2, ainsi que celle de cinq sujets TSA présentant un score à l'AQ inférieur à 30 dans l'étude 2. Les GLMM ont été refaits sans ces participants (2 non-TSA et 5 TSA) et les résultats étaient identiques à ceux présentement rapportés (dans l'étude 1 et 2).

En second lieu, bien que les consignes de la tâche avaient été explicitement données aux participants, qui leur demandaient de regarder le centre de l'écran, l'utilisation d'un eye tracker aurait été intéressante. Elle aurait permis de vérifier l'orientation du regard des participants vers l'écran d'affichage. Des stratégies telles que tourner la tête et percevoir des stimuli à partir du champ visuel périphérique, qui est communément connu pour être plus sensible aux informations en mouvement (Fahle & Wehrhahn, 1991), a pu être mis en place par les participants AQ+ par exemple. D'autres stratégies ont pu être investies telles que le détournement du regard dans le TSA, qui aurait pu être une mesure particulièrement intéressante concernant l'étude de comportements d'aversion au mouvement en profondeur.

En troisième lieu, il est possible que les interactions Modalité x Mouvement et Modalité x Vitesse aient été guidées par les caractéristiques physiques des stimuli. L'idée ici est que l'amélioration des réponses en condition d'approche audiovisuelle et dans les conditions audiovisuelles de vitesse rapide aient été guidée par de la facilitation statistique et non par des interactions intégratives. En effet, le mouvement en approche est caractérisé par une augmentation de la quantité d'informations dans le champ visuel et une augmentation de

l'intensité sonore, lui conférant une intensité globale plus élevée que le mouvement en éloignement. Concernant le mouvement à vitesse rapide, la quantité d'informations visuelles et auditives est ~2x plus importantes que le mouvement en vitesse lente lors des premières 250 ms des stimuli. Cappe et al. (2009) avaient initialement considéré ce potentiel effet d'intensité concernant l'interaction Modalité x Mouvement dans une étude additionnelle à partir de stimuli en approche et en éloignement qui étaient physiquement identiques (voir Figure 38). Les auteurs avaient néanmoins retrouvé des temps de réaction plus courts en condition d'approche audiovisuelle. Concernant l'interaction Modalité x Vitesse, tester l'effet de l'intensité des stimuli sur le bénéfice comportemental en condition audiovisuelle semble plus complexe mais pourrait se faire en variant l'accélération des stimuli, que ce soit sur l'ensemble du stimulus ou sur une partie du stimulus. Ces notions d'effet de l'intensité des stimuli pourraient être considérées dans de futures études investissant la personnalité autistique et le TSA.

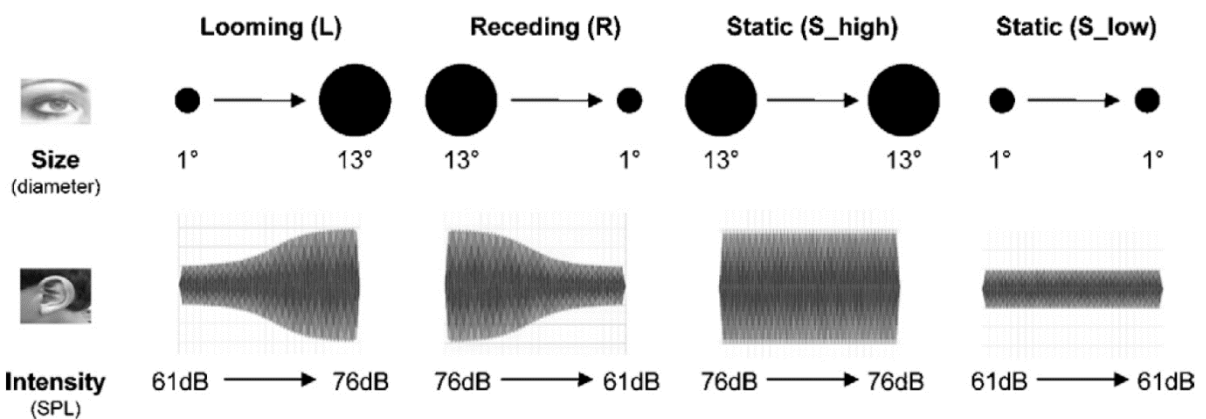


Figure 38. Expérience additionnelle permettant de tester l'effet d'intensité des stimuli dans l'interaction Modalité x Mouvement. Les informations en approche et en éloignement étaient physiquement identiques. Issue de *Cappe et al. (2009)*.

En quatrième lieu, nous ne pouvons pas exclure la présence de processus anticipatoires au sein de nos tâches expérimentales. Ce processus est particulièrement à considérer dans l'analyse des données EEG car plusieurs études ont suggéré un biais d'effet d'anticipation au sein du modèle additif de l'IMS (Molholm et al., 2002; Teder-Sälejärvi et al., 2002). Plus concrètement, une activité anticipatoire pour chacun des stimuli (A, V et AV) sera représentée deux fois dans l'ERP A+V et une seule fois dans l'ERP AV, générant des effets non-linéaires qui pourraient être confondus avec une interaction audiovisuelle. L'ERP *contingent negative variation* qui précède un stimulus prédit nécessitant une réponse motrice rapide et qui a été lié à la préparation motrice et au processus d'anticipation (Walter et al., 1964), a effectivement entraîné des biais dans le modèle additif (Teder-Sälejärvi et al., 2002). Dans le TSA, une amplitude plus importante de la CNV a été rapportée par plusieurs études (Høyland et al., 2017; Tye et al., 2014). Thillay et al. (2016) ont retrouvé une amplitude plus élevée de la CNV pour les participants TSA et contrôles concernant des cibles prévisibles, mais uniquement dans le TSA lorsque les cibles étaient présentées aléatoirement. Ces études ont suggéré des réponses anticipatoires dans le TSA plus élevées et mettent en évidence la nécessité de prendre en considération ce phénomène lors de l'application du modèle additif dans l'étude de l'IMS. De plus, nous nous demandons dans quelle mesure ces résultats peuvent s'étendre dans la personnalité autistique, puisqu'aucune étude sur la CNV n'a été proposée. S'il existe réellement des différences au sein des processus d'anticipation dans le TSA et dans la personnalité autistique, cela pourrait impacter les résultats du modèle additif.

Pour confirmer que les ERPs d'anticipation ne contribuent pas aux effets non-linéaires du modèle additif, Molholm et al. (2002) proposent de comparer l'apparition du premier effet non-linéaire entre différentes valeurs de baseline (100 à 50 ms pré-stimulus vs. 50 ms préstimulus à 10 ms post-stimulus). Si l'effet est une conséquence des ERPs d'anticipation, alors la latence à laquelle il apparaît devrait être modulée selon les valeurs de baseline (Teder-Sälejärvi et al., 2002). Enfin, une inspection des ERPs du modèle additif (AV-A+V) basés sur la grande moyenne concernant des périodes pré-stimulus jusqu'à 250 ms pourraient également informer de la contribution d'effets d'anticipation sur les effets d'IMS (Molholm et al., 2002). Ces deux dernières analyses resteront à être menées au sein de notre étude EEG, pour l'ensemble des participants et au sein de chaque groupe AQ.

En cinquième lieu, l'hétérogénéité du TSA illustre l'idée de spectre (Lenroot & Yeung, 2013). Alors que les versions précédentes du DSM incluaient plusieurs conditions indépendantes, la version actuelle distingue différents degrés de sévérité des symptômes au sein d'une même condition clinique (APA, 2013). Le spectre comprend des individus à haut niveau de

fonctionnement qui sont amplement capables de verbaliser et d'acquérir des compétences d'adaptation, alors qu'à l'autre extrémité du spectre, les individus à faible niveau de fonctionnement (40 % de l'ensemble de la population TSA) sont généralement peu verbaux ou non verbaux et présentent un retard intellectuel (Brown et al., 2017). Parce que ces derniers peuvent participer de manière limitée aux recherches en sciences, surtout si une participation active est demandée, ils sont couramment négligés au sein de la recherche sur le TSA (Chakrabarti, 2017). Cela représente un risque clair de *disease spectrum bias*, car le spectre complet est rarement étudié (Sica, 2006). Nous pouvons envisager qu'au vu de l'hétérogénéité des profils au sein du TSA, les particularités d'IMS d'informations dynamiques ne pourraient concerner qu'une partie du spectre ou certains profils autistiques. L'objectif ici serait d'étudier une telle intégration sur des individus TSA à fonctionnements différents (à différents niveaux du spectre) et de caractériser au mieux leurs profils de fonctionnement à partir d'outils variés, évaluant les dimensions sociales, cognitives et comportementales. Au niveau du paradigme expérimental, plutôt qu'une participation active de détection, des mesures de suivi oculaire pourraient être proposées (enregistrement à partir d'un eye tracker). En outre, l'âge des participants représente également une caractéristique importante. De même que pour les problèmes liés à l'inclusion de la partie du spectre à faible fonctionnement, il est évident que l'inclusion de jeunes enfants est généralement plus difficile que l'inclusion d'adultes. Pour la recherche sur les troubles neurodéveloppementaux, cela pourrait entraîner un biais d'interprétation des résultats. Dans le TSA, par exemple, les différences retrouvées dans des groupes d'adultes pourraient refléter l'expérience de privation sociale au lieu d'une véritable caractéristique « autistique » et à l'inverse, une absence de différence pourrait être la conséquence de mécanismes de compensation. En ce sens, il semble crucial d'étendre nos études à la fois à un spectre plus large du TSA et à des enfants (l'inclusion d'adolescents est toujours en cours).

Vers une approche écologique du TSA

La notion de validité écologique a été introduite par Brunswik (1955) pour orienter les recherches vers une compréhension des individus dans leur environnement naturel et par conséquent, d'élaborer des stratégies de recherche compatibles avec cet objectif. S'il est important de constituer un groupe avec des individus représentatifs de la population étudiée, il en est de même pour les situations dans lesquelles se retrouvent ces mêmes individus. Pour créer des situations représentatives, le chercheur doit simuler une situation réaliste de départ, puis lui apporter des modifications systématiques de façon à couvrir l'éventail des situations que pourra rencontrer l'individu (Braun, 1997). La prégnance des informations multisensorielles et changeantes/mouvantes dans l'environnement nous suggère l'importance d'explorer la manière dont elles sont intégrées dans le TSA, qui semble présenter son propre fonctionnement sensoriel. Le présent travail de thèse n'avait pas la prétention d'appliquer une approche écologique dans l'étude du TSA mais de s'en approcher en utilisant des stimuli pertinents dans notre environnement. Le problème classique dans notre paradigme expérimental se trouve dans les conditions expérimentales contrôlées qui reflètent pauvrement l'environnement mais qui sont pourtant nécessaires dans l'évaluation d'un processus isolé. Vient s'introduire ici la nécessité d'enrichir la littérature concernant l'IMS de mouvement en profondeur dans le TSA afin de pouvoir évoluer pas à pas vers une évaluation plus fidèle au monde réel. Dans cette perspective, Hannah & Aron (2021) suggèrent l'utilisation de la réalité virtuelle (*Virtual Reality, VR*) qui exposerait les participants à des signaux plus naturels tout en restant dans un cadre contrôlé de recherche. L'utilisation de la réalité virtuelle pourrait ainsi constituer une étape intermédiaire avant le passage au contexte purement écologique. Cela pourrait se faire par exemple, en exposant les individus à des scènes de mouvement en approche et en éloignement variées (à partir de personnes ou d'objets ou en simulant des déplacements dans l'environnement) et en faisant varier le contexte (interactions avec un personnage virtuel par exemple). Au-delà des réponses comportementales qui pourront être enregistrées (réactivité posturale, temps de réaction etc.), notons qu'il est aujourd'hui possible d'enregistrer l'activité oculomotrice à partir d'eye tracker simultanément à l'utilisation de la réalité virtuelle (voir la revue de Adhanom et al., 2023) ainsi que l'enregistrement de signaux EEG simultanément à l'utilisation de la réalité virtuelle (Tromp et al., 2018). Pour la suite, l'appropriation d'une démarche inductive pourrait consolider (ou non) les résultats mis en évidence dans des conditions expérimentales de laboratoire. Cela a déjà été relativement le cas dans l'étude plus générale du traitement sensoriel dans le TSA, qui s'est largement inspirée d'observations

cliniques (des cliniciens, des individus TSA, des proches) d'hyper/hypo sensibilités sensorielles. Pour l'IMS nous pourrions considérer les réactivités de l'individu TSA selon la nature des stimuli en milieu écologique dans sa vie quotidienne. Reprenons ici l'utilisation des films familiaux qui ont représenté un support riche et malléable dans l'étude du fonctionnement sensoriel de l'individu TSA et qui a permis une analyse très fine des comportements précoces de l'enfant dans son milieu naturel (Adrien & Gattegno, 2004). Des analyses de ces films en considérant le mouvement environnant et les modalités sensorielles investies seraient particulièrement intéressantes. Par exemple, le comportement et le contenu verbal de l'enfant pourraient être analysés dans un contexte multisensoriel d'habillage qui implique les praxies, de même qu'un traitement visuel et tactile de l'information ou dans un contexte de mouvement, lors d'utilisation de balançoires ou de tourniquets. Ces analyses devront effectivement considérer les biais déjà mis en évidence dans cette approche méthodologique (e.g., faire correspondre les types de situations dans les films ainsi que la durée des images, choix des scènes filmées par les familles).

L'objectif de la présente thèse était de caractériser l'intégration multisensorielle de mouvement en profondeur le long du continuum autistique (dans la personnalité autistique et dans le TSA). Bien que les résultats actuels de la thèse aient en partie répondu à cet objectif, ils ouvrent également un champ de questionnements et appellent de futurs travaux à y répondre. Cela est notamment le cas du modèle dimensionnel dans le TSA qui gagnerait à être exploré à partir d'outils de mesures autistiques variés afin de tester sa validité. Dans le cadre plus spécifique du sujet de thèse, étudier les corrélats neuronaux de l'IMS de stimuli en mouvement dans le TSA permettra de caractériser plus encore la linéarité du continuum autistique. De plus, proposer un paradigme de détection de différents mouvements permettrait de saisir dans quelle mesure les résultats actuels pourraient ou non, se transférer à d'autres types de mouvement ou seraient plutôt spécifiques au mouvement en profondeur. L'effet de la vitesse dans nos études inspire également de nombreuses pistes de recherche qui pourraient investiguer plus encore la manière dont la vitesse de présentation affecte les processus perceptuels et intégratifs pour des stimuli de nature différente (sociale ou non-sociale) au sein du continuum autistique.

4 ANNEXE

4.1 Un spectre de théories pour un spectre de l'autisme

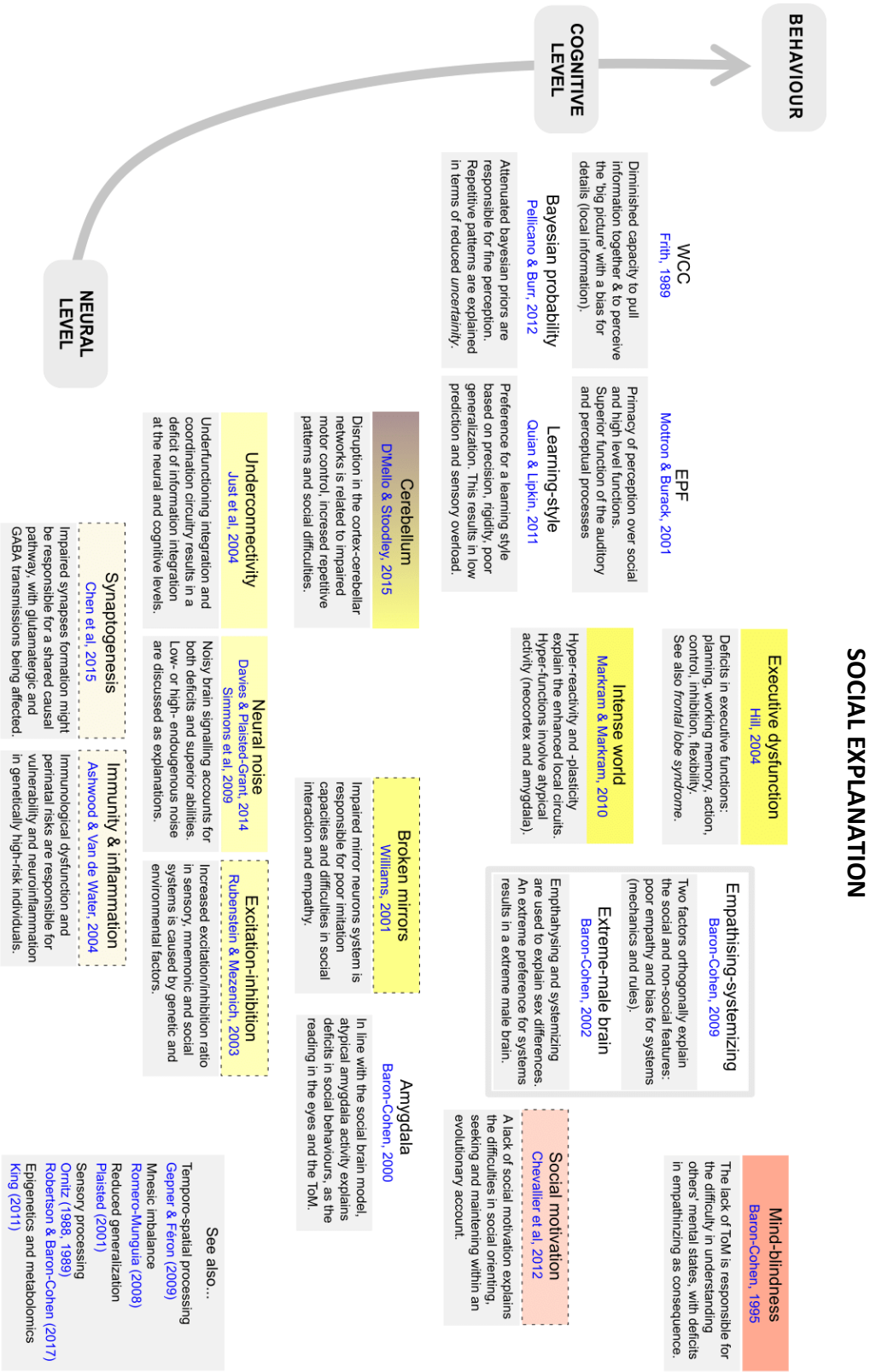


Figure 39. Schéma des principales théories sur le TSA, de celles davantage basées sur le fonctionnement neuronal à celles plus cognitives et comportementales (de bas en haut). Les théories sont organisées horizontalement en fonction l'importance accordée aux déficits sociaux au sein des théories (de gauche à droite). Issue de *Kovarski (2018)*.

4.2 Real-life vs. Online social skills in ASD

Social impairment in the autistic spectrum: real-life versus online perceived social skills

Cette étude a été soumise dans la revue *Advances in Neurodevelopmental Disorders* - Springer

Social impairment in the autistic spectrum: real-life versus online perceived social skills

R. Poulain^{1,2}, C. Cappe², M. Batty¹

¹Centre d'études et de recherches en psychopathologie et psychologie de la santé, EA7411, Université Toulouse 2, France

²Centre de Recherche Cerveau et Cognition, UMR 5549 CNRS, Université Toulouse 3, France

Abstract

Autism Spectrum Disorder (ASD) is characterized by a wide range of socio-communicative difficulties. However, while there is growing evidence that social difficulties could be overcome by the use of online communication, no study has investigated online social skills in the autism spectrum. We filled this gap by assessing the real-life and online social skills of subjects from the general population according to their degree of autistic traits using self-reported questionnaires. Results showed a direct influence of the level of autistic traits on real-life and online social skills: participants having a high autistic personality demonstrated a lower level of real-life social skills and conversely higher online social skills. By revealing accentuated difficulties in real-life social interactions and facilities in online ones, our results highlight substantial evidence of context-dependent social difficulties within the autistic spectrum. Thus, our results report crucial preliminary evidence of a beneficial use of online social interactions within the autistic spectrum and constitute an interesting lead in the use of an electronic mediator within social remediations.

Keywords Autistic personality, Social skills, Self-reported questionnaires, Internet use

1. Introduction

When meeting a person with Autism Spectrum Disorder (ASD), one typically notices differences in their social behavior: an unusual eye gaze (which may be reduced or over-extended), and when present, atypical speech with a lack of nonverbal gestures and facial expressions, as well as an unusual voice rhythm that sounds slightly stilted or ‘robotic’ (Asperger, 1944; Attwood, 1998; Kanner, 1943). Socio-communicative difficulties are indeed considered as a major dysfunctional element in ASD and constitute the first axis of diagnosis, the second being repetitive and restricted behaviors (APA, 2013). As a spectrum disorder, specific traits associated with ASD are not only found in individuals with a clinical diagnosis but are also found in the general population. In order to assess the degree of autistic traits in any individual adult, psychometric tools were developed, such as the “Autism spectrum Quotient” (AQ; Baron-Cohen et al., 2001). The impaired responses to social information typically observed in ASD are also found in people without ASD but with high autistic traits (e.g., Stewart & Ota, 2008; Voos et al., 2013).

The internet is a vehicle of communication used by a large number of people. Various studies have found that internet use fosters and facilitates social interaction by decreasing social isolation and loneliness, as well as increasing social connectivity (e.g., Adams & Stevenson, 2004; Bradley & Poppen, 2003; Erickson & Johnson, 2011; White et al., 1999). Some studies of the last decade highlighted a preference among autistic people for communicating online. The slower pace of the online environment is suggested as one of the most important reasons for this preference, which may be explained by a decrease in demands on information processing ability (van der Aa et al., 2016). Further, written computer-mediated communication could reduce the social stress surrounding conventions related to, for example, body language, eye contact, and tone of voice, all of which can be very distressing for a person with ASD (Westerberg et al., 2021). Consequently, ASD subjects reported higher satisfaction with their online social life than with their social life and life in general (van der Aa et al., 2016), a feeling of greater understanding and control over communication, and the opportunity to express their true selves in computer-mediated communication (Gillespie-Lynch et al., 2014). In addition, internet use gives ASD subjects the feeling of a greater quantity and quality of friendship and drastically decreases feelings of loneliness (Mazurek, 2014), commonly observed in ASD due to social difficulties (Umagami et al., 2022). However, so far, no studies have investigated online social skills in the autism spectrum, while an easy-to-administer tool has recently been developed to specifically assess communicative and online socio-emotional skills

(Mantzouranis et al., 2019). The purpose of this study was to examine global social skills both online and in real life according to autistic personality traits, in order to better characterize social functioning in everyday life situations within the autism spectrum.

2. Method

2.1 Participants

Seventy-five participants (10 males) from the general population using social networks to communicate participated in the present study (Mean age=34.54; SD=11.93; Range=12-55). Note that the use of the Real and Electronic Communication Skills questionnaire (RECS) did not reveal any gender effect in the original study (Mantzouranis et al., 2019). The study conformed with the Code of Ethics of the World Medical Associations (Declaration of Helsinki) and was approved by the local research ethics committee (Comité de Protection des Personnes Sud Méditerranée III, Avis N° 2020-A03056-33).

2.2 Autistic traits and social profile

The Autism-Spectrum Quotient (AQ) is a validated 50-item self-report questionnaire for identifying the degree to which an adult presents autistic traits. The instrument measures five dimensions: Social skill, Attention switching, Attention to detail, Communication and Imagination (Baron-Cohen et al., 2001). Each response is scored 0 or 1; a higher score indicates higher levels of autistic behavior. We used the French version of the AQ (Kempnaers et al., 2017).

In order to obtain an assessment of the social abilities of the participants, a validated questionnaire in French, the Real and Electronic Communication Skills questionnaire (RECS; Mantzouranis et al., 2019) was administered. This instrument includes two self-reported questionnaires, one assessing social abilities in real life (Real Communication Skills; RCS) and the other assessing online social abilities (Electronic Communication Skills; ECS). Each of these questionnaires includes 18 items that are scored with a 5-point Likert scale and are composed of four dimensions: Sociability, Disclosure, Emotion Decoding and Assertiveness.

2.3 Procedure

All the questionnaires were computerized and completed online by the participants in the following order: AQ-RCS-ECS.

2.4 Statistical analysis

In order to examine the relationship between autistic traits and the social abilities of participants, Pearson's correlations were applied on the total and subscale scores for the AQ and the RCS, as well as for the AQ and the ECS. The relation between the online social skills (ECS) and real-life social skills (RCS) was also examined using similar tests. The effect of autistic traits on social abilities assessed with real-life situations has been commonly highlighted in the autistic personality; the high autistic personality shows greater social difficulties (e.g., Stewart & Ota, 2008; Voos et al., 2013). However, the correlational analyses do not provide a sense of the relationship between variables. In this context, a Structural Equation Model (SEM) was used to test the influence of autistic traits (AQ) on online social skills (ECS). SEM is a multivariate statistical analysis technique that is used to analyze structural relationships by using path models that mathematically represent the causal influences on the variables of interest.

3. Results

The global score of the AQ ranged from 3 to 32 with a mean of 17.82 (SD=6.16). The mean score of the RCS was 60.75 (SD=9.11) with a range from 36 to 80. The ECS ranged from 34 to 66 and presented a mean of 46.8 (SD=7.06).

The means, standard deviations and ranges of total scores, and dimensions of the questionnaires are presented in Table 10.

Table 10. Means, SDs and ranges of the questionnaires

	AQ total (0-50)	Social skills (0-10)	Att. Switch. (0-10)	Att. to detail (0-10)	Comm. (0-10)	Imag. (0-10)
Mean (SD)	18.09 (6.16)	3.22 (2.41)	4.21 (1.81)	5.37 (2.3)	2.56 (1.88)	2.74 (1.66)
Range	5-32	0-10	1-9	0-10	0-7	0-7
	ECS total (0-90)	Sociability (0-25)	Disclosure (0-25)	Emo. Decod. (0-25)	Assertiv. (0-15)	
Mean (SD)	47.4 (7.85)	9.2 (3.61)	11.81 (3.73)	17.02 (3.13)	9.39 (2.38)	
Range	34-71	5-25	5-23	11-25	3-14	
	RCS total (0-90)	Sociability (0-25)	Disclosure (0-25)	Emo. Decod. (0-25)	Assertiv. (0-15)	
Mean (SD)	61.22 (8.51)	13.93 (4.19)	15.56 (4.59)	20.7 (2.28)	11.04 (2.08)	
Range	44-76	5-25	6-24	16-25	6-15	

The results of Pearson's correlation between total scores and dimensions of the questionnaires are presented in Table 11. In general, the results demonstrated a significant negative correlation between autistic traits (AQ) and social skills in real life (RCS), with higher levels of autistic traits related to lower social abilities in real life (see Fig. 40A). This is to be expected since the social dimensions of the AQ are based on real-life social scenes. In contrast, the autistic traits (AQ) correlated positively with online social skills (ECS), meaning that the more the participants had autistic traits, the more they reported online social skills (see Fig. 40B). Note that the correlations between the RCS and the ECS with the AQ do not concern the same dimensions of the questionnaires. Specifically, the correlation between the AQ and RCS was primarily driven by negative relationships between the dimensions assessing social skills on the questionnaires. The more social difficulties participants expressed (Social skills, AQ), the fewer social skills (Sociability, RCS) and emotion decoding (Emotion decoding, RCS) they reported. Similarly, the more they perceived difficulty communicating (Communication, AQ), the less they were able to socialize (Sociability, RCS), and the less they were able to be assertive in conversations by sharing their opinions (Assertiveness, RCS). Other dimensions drove the positive correlation between the AQ and the ECS. The more subjects expressed difficulties imagining (Imagination, AQ), the more ease they reported in online social interactions (ECS total). In addition, the more difficulties subjects had in sustaining a conversation (Communication, AQ), the more intimate information they shared with others (disclosure, ECS). No significant correlation was found between real-life and online social skills.

Table 11. Pearson correlation matrix between the questionnaires

	AQ total	Social skills	Att. Switch.	Att. to detail	Comm.	Imag.
RCS total	-0.34***	-0.44***	-0.24*	0.14	-0.32**	-0.21*
Sociability	-0.37**	-0.64***	-0.23*	0.23*	-0.30**	-0.18
Disclosure	-0.11	-0.022	-0.12	-0.027	-0.094	-0.075
Emo. Decod.	-0.15	-0.31**	-0.084	0.21*	-0.17	-0.12
Assertiv.	-0.33***	-0.23*	-0.19	-0.038	-0.34***	-0.24*
	AQ total	Social skills	Att. Switch.	Att. to detail	Comm.	Imag.
ECS total	0.29*	0.018	0.23*	0.22	0.15	0.30**
Sociability	0.099	-0.19	0.16	0.22	0.057	0.086
Disclosure	0.37**	0.24*	0.25*	0.053	0.33**	0.28*
Emo. Decod.	0.087	-0.093	-0.12	0.29*	-0.0004	0.18
Assertiv.	0.064	0.058	0.26*	-0.078	-0.13	0.13
	ECS total	Sociability	Disclosure	Emo. Decod.	Assertiv.	
RCS total	0.21	0.24*	0.13	0.11	-0.016	
Sociability	0.20	0.40***	-0.054	0.15	-0.04	
Disclosure	0.19	0.10	0.47***	-0.17	-0.075	
Emo. Decod.	0.035	-0.025	-0.18	0.35**	-0.038	
Assertiv.	0.04	0.00011	-0.016	0.12	0.22	

* $p < .05$; ** $p < .01$; *** $p < .001$

The application of a structural equation model showed significant regression coefficients between autistic traits and real-life social skills ($-0.50, p < .001$), between autistic traits and online social skills ($0.33, p < .05$), and between real-life social skills and online social skills ($0.24, p < .01$, see Fig. 40C). The significance of the indirect effect (the influence of AQ on ECS mediated by RCS) was tested using bootstrapping procedures. Unstandardized indirect effects were computed for each of 1 000 bootstrapped samples, and the 95% confidence interval was computed by determining the indirect effects at the 2.5th and 97.5th percentiles. The bootstrapped unstandardized indirect effect was -0.08 and the 95% confidence interval ranged from -0.19 to 0 ($p = .058$). Thus, autistic traits significantly influenced perceived online social skills and real-life ones. In addition, the influence of autistic traits on online social skills was not mediated by real-life social skills.

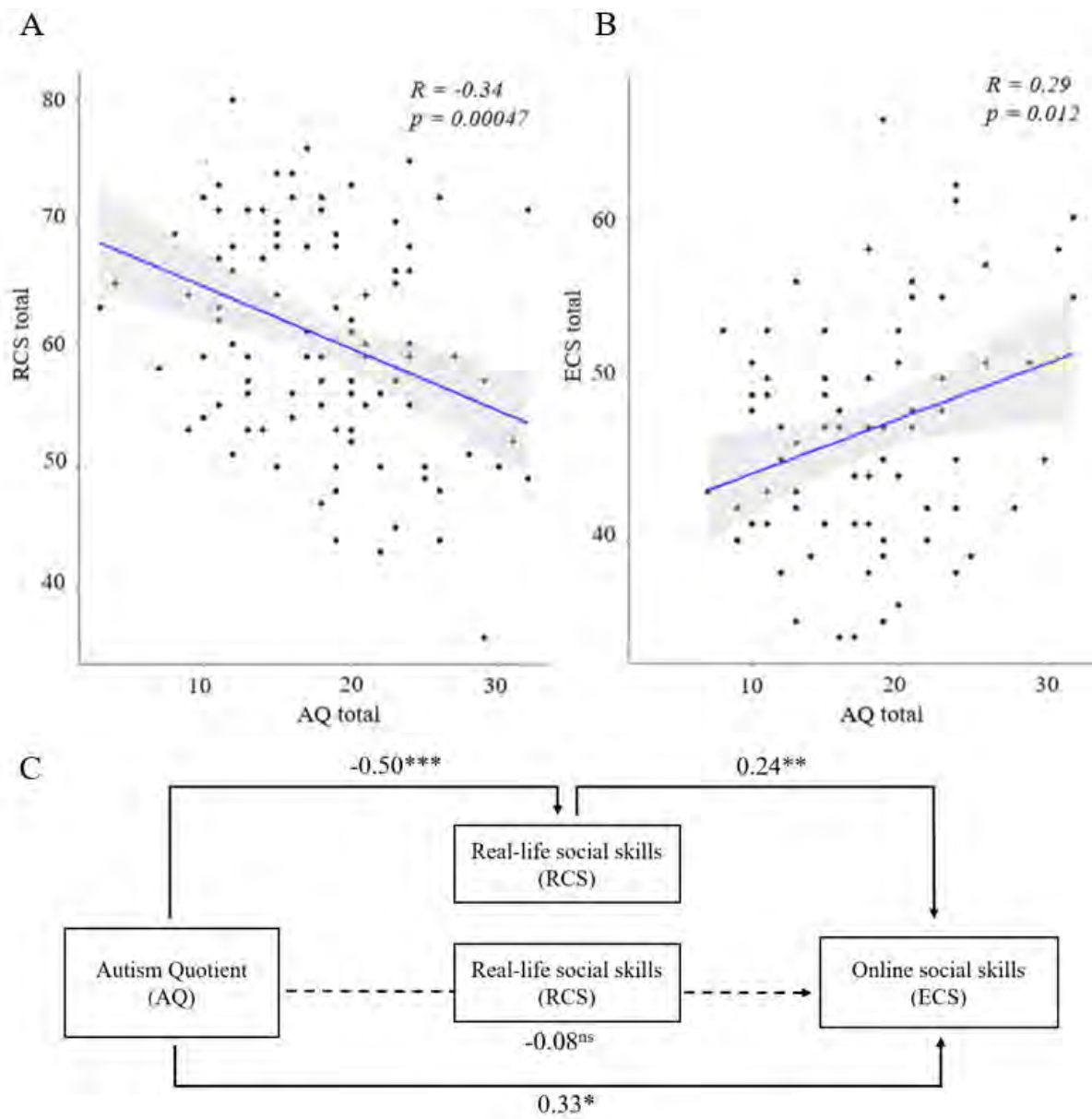


Figure 40. Relation between autistic traits and social skills. Correlation between (A) the autistic traits (AQ) and the social skills in real life (RCS) and (B) the autistic traits (AQ) and online social skills (ECS). (C) Tested model regarding the relationship between autistic traits, and online and real-life social skills. $*p < .05$; $**p < .01$; $***p < .001$

4. Discussion

Within the autistic spectrum (ASD and high autistic personality), social difficulties have commonly been explored using questionnaires or experimental paradigms focusing on real-life social situations. No study has yet explored social skills in an electronic context (i.e., online). However, such an investigation is crucial to characterize social functioning in everyday life situations to better understand socio-communicative difficulties which are central within the autistic spectrum. We addressed this lack by assessing the autistic personality traits of participants from the general population and highlighted that participants with a higher autistic personality presented lower social skills in real life and higher online social skills than participants with a lower autistic personality. These results, which reveal accentuated difficulties in real-life social interactions and facilities in online ones, suggest that the social difficulties commonly reported in the autistic spectrum could be context-dependent. Our results provide crucial preliminary evidence of the positive social capital that participants with a high autistic personality gain by participating in online social interactions and constitute an interesting avenue for the development of strengths-based interventions in ASD. Thus, the use of an electronic mediator could be considered as a complement to the use of real-life situations within social remediations. Furthermore, identifying the factors responsible for the perception of higher online social skills could inform us on how to modify the environment to promote social interactions in the autistic spectrum or, even better, to promote the development of social abilities of ASD children.

In face-to-face conversations, people with ASD often have difficulties interpreting non-verbal communication cues (body language, tone of voice, etc.), which are critical to understanding the speaker's intent (APA, 2013). In addition, people with ASD may feel the need to have more time than non-ASD subjects to interpret a conversation and formulate a response (Haigh et al., 2018). Instead, online interactions offer stable cues over time, visual signs of organization, and a presentation accompanying the written text that helps the user decipher the speaker's intentions, such as font features, punctuation, emoticons, etc., and allow participants to respond at their own pace. In this sense, online interactions potentially offer people with ASD the opportunity to communicate more comfortably and benefit from more easily interpretable cues (e.g., emoticons are always the same, whereas in real life, everyone expresses their emotions differently). Such a socially explicit online environment could also explain the link found in the present study between online social skills and difficulties in imagining. Participants with the most difficulty imagining may benefit more from supports that facilitate the representation of fictional scenes (pictures, videos, emoticons, descriptions, etc.). It would be useful to conduct

research on the use of social networks in the autistic spectrum to better understand the origin of such ease in online social communication. This could be done by asking individuals on the autism spectrum about their use of social networks, both in terms of frequency of use and content viewed. It would be relevant to know (a) with whom the subject communicates: with new people or if he/she focuses his/her interactions on the same ones; (b) what the subject talks about: if the topics of conversations are heterogeneous; (c) how he/she communicates: if he/she uses emoticons and if these are adapted to the conversation. The response time could also be analyzed as well as eye-tracking measures on the exploration of the interface and the reading of messages. In order to test the effect of the sensory environment, it could be envisaged to vary the number and intensity of sensory information cues while assessing the perceived online social skills.

A higher sensory sensitivity has been well characterized all along the autistic spectrum (e.g., Markram & Markram, 2010; Mayer, 2017; Takayama et al., 2014) and the sensory profile is commonly associated with the severity of symptoms or the degree of autistic traits (e.g., Horder et al., 2014; Mayer, 2017). Thus, using electronic devices to communicate could reduce sensory inputs and increase social skills. More precisely, the intensity of sensory inputs is directly and instantly modular when using electronic tools (such as the auditory dB level or the light intensity), which is not the case in real-life contexts. In addition, this sensory sensitivity could lead to a saturation of the perceptual load in real life, generating social difficulties. Specifically, a recent study found a decrease in the severity of social difficulties in ASD when the number of surrounding items of information is diminished (Haskins et al., 2022). In this vein, since the amount of information is severely diminished online and focuses on the relevant information to be processed (e.g., the main information from a conversation with another person), this may favor adapted social behaviors.

Moreover, one of the specificities of online social communication is the highly structured communicative environment: since the design of social networks is stable, the appearance of conversations is similar from one person to another. Communicating online allows us to choose the people with whom to interact and who share common interests with us. All these elements are markedly reduced in real life, where interactions take place in different contexts, with a changing environment and are more random and unexpected. One of the particularities of ASD is the axis of high-intensity restricted interests as well as the excessive adherence to regular patterns (e.g. setting up routines or rituals) and the marked preference for predictable information (APA, 2013). Thus, it is possible that the regular and predictable environment of online communication as well as control over conversational topics and choices with whom to

engage/respond foster engagement in social interactions in the autistic spectrum. In addition, such control of the social content could be at the origin of the internet addictions commonly highlighted in ASD (e.g., Murray et al., 2022) and in people without ASD but with high autistic traits (e.g., Finkenauer et al., 2012).

Finally, correlation analysis showed that the facilitation of online social skills concerned more particularly the states of self-disclosure in subjects with communication difficulties. The more subjects exhibited high autistic personality traits, the more they opened up about their intimacy with others. Self-disclosure behaviors are particularly implicated in developing or maintaining intimate relationships (Brehm et al., 2002). The online environment could represent a defined and restricted place where ASD subjects or high autistic personality subjects could direct interactions with their most intimate relatives, motivating self-disclosure behaviors. Nevertheless, despite the fact that revealing information about self can help people as they attempt to maintain close relationships with others, some authors (Miell & Duck, 1986) suggest that self-disclosure could generate problems for individuals and relationships. Individuals must learn to regulate their disclosures to avoid inappropriate self-disclosure in conversation with a stranger or to control revealing feelings with close friends that can be “cruel and destroy trust” (Hargie, 2006). Notably, because self-disclosure behaviors are linked to communication difficulties, it would be interesting to explore how and with whom subjects engage in self-disclosure behaviors within the autistic spectrum. Such an investigation would allow us to understand better whether online use promotes or hinders the appropriate use of self-disclosure in individuals with high communication difficulties.

Authors have no conflicts of interests to disclose.

References

- Adams, R. G., & Stevenson, M. L. (2004). *A Lifetime of Relationships Mediated by Technology*. In *Growing Together : Personal Relationships across the Life Span*. Cambridge University Press.
- APA. (2013). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders (DSM-5)*. American Psychiatric Association, Washington, DC.
- Asperger, H. (1944). Die „Autistischen Psychopathen“ im Kindesalter | SpringerLink.
<https://link.springer.com/article/10.1007/BF01837709>
- Attwood, T. (1998). *Asperger's syndrome*. London: Jessica Kingsley.
- Baron-Cohen, S., Wheelwright, S., Skinner, R., Martin, J., & Clubley, E. (2001). The autism-spectrum quotient (AQ) : Evidence from Asperger syndrome/high-functioning autism, males and females, scientists and mathematicians. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 31(1), 5-17. <https://doi.org/10.1023/A:1005653411471>
- Bradley, N., & Poppen, W. (2003). Assistive technology, computers and Internet may decrease sense of isolation for homebound elderly and disabled persons. *Technology and Disability*, 15(1), 19-25. <https://doi.org/10.3233/TAD-2003-15104>
- Brehm, S. S., Miller, R. S., Perlman, D., & Campbell, S. M. (2002). *Intimate relationships (4e éd.)*. New York: McGraw-Hill.
- Erickson, J., & Johnson, G. M. (2011). Internet use and psychological wellness during late adulthood. *Canadian Journal on Aging = La Revue Canadienne Du Vieillissement*, 30(2), 197-209. <https://doi.org/10.1017/S0714980811000109>
- Finkenauer, C., Pollmann, M. M. H., Begeer, S., & Kerkhof, P. (2012). Brief Report : Examining the Link Between Autistic Traits and Compulsive Internet Use in a Non-Clinical Sample. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 42(10), 2252-2256. <https://doi.org/10.1007/s10803-012-1465-4>
- Gillespie-Lynch, K., Kapp, S. K., Shane-Simpson, C., Smith, D. S., & Hutman, T. (2014). Intersections between the autism spectrum and the internet : Perceived benefits and preferred functions of computer-mediated communication. *Intellectual and Developmental Disabilities*, 52(6), 456-469. <https://doi.org/10.1352/1934-9556-52.6.456>
- Haigh, S. M., Walsh, J. A., Mazefsky, C. A., Minshew, N. J., & Eack, S. M. (2018). Processing Speed is Impaired in Adults with Autism Spectrum Disorder, and Relates to Social Communication Abilities. *Journal of autism and developmental disorders*, 48(8), 2653-2662. <https://doi.org/10.1007/s10803-018-3515-z>
- Hargie, O. (2006). *The handbook of communication skills (3e éd.)*. Routledge.
- Haskins, A. J., Mentch, J., Botch, T. L., Garcia, B. D., Burrows, A. L., & Robertson, C. E. (2022). Reduced social attention in autism is magnified by perceptual load in naturalistic environments. *Autism Research*, 15(12), 2310-2323. <https://doi.org/10.1002/aur.2829>
- Horder, J., Wilson, C. E., Mendez, M. A., & Murphy, D. G. (2014). Autistic Traits and Abnormal Sensory Experiences in Adults. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 44(6), 1461-1469. <https://doi.org/10.1007/s10803-013-2012-7>
- Kanner, L. (1943). Autistic disturbances of affective contact. 2, 217-250.
- Kempnaers, C., Braun, S., Delvaux, N., & Linkowski, P. (2017). The assessment of autistic traits with the Autism Spectrum Quotient : Contribution of the French version to its construct validity. *European Review of Applied Psychology*, 67(6), 299-306. <https://doi.org/10.1016/j.erap.2017.09.001>
- Mantzouranis, G., Baudat, S., & Zimmermann, G. (2019). *Assessing Online and Offline Adolescent Social Skills : Development and Validation of the Real and Electronic Communication Skills*

- Questionnaire. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 22(6), 404-411.
<https://doi.org/10.1089/cyber.2018.0655>
- Markram, K., & Markram, H. (2010). The Intense World Theory – A Unifying Theory of the Neurobiology of Autism. *Frontiers in Human Neuroscience*, 4.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2010.00224>
- Mayer, J. L. (2017). The Relationship Between Autistic Traits and Atypical Sensory Functioning in Neurotypical and ASD Adults : A Spectrum Approach. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 47(2), 316-327. <https://doi.org/10.1007/s10803-016-2948-5>
- Mazurek, M. O. (2014). Loneliness, friendship, and well-being in adults with autism spectrum disorders. *Autism: The International Journal of Research and Practice*, 18(3), 223-232.
<https://doi.org/10.1177/1362361312474121>
- Miell, D., & Duck, S. (1986). Strategies in Developing Friendships. In V. J. Derlega & B. A. Winstead (Éds.), *Friendship and Social Interaction* (p. 129-143). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4880-4_7
- Murray, A., Koronczai, B., Király, O., Griffiths, M. D., Mannion, A., Leader, G., & Demetrovics, Z. (2022). Autism, Problematic Internet Use and Gaming Disorder : A Systematic Review. *Review Journal of Autism and Developmental Disorders*, 9(1), 120-140.
<https://doi.org/10.1007/s40489-021-00243-0>
- Stewart, M. E., & Ota, M. (2008). Lexical effects on speech perception in individuals with “autistic” traits. *Cognition*, 109(1), 157-162. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2008.07.010>
- Takayama, Y., Hashimoto, R., Tani, M., Kanai, C., Yamada, T., Watanabe, H., Ono, T., Kato, N., & Iwanami, A. (2014). Standardization of the Japanese version of the Glasgow Sensory Questionnaire (GSQ). *Research in Autism Spectrum Disorders*, 8(4), 347-353.
<https://doi.org/10.1016/j.rasd.2013.12.017>
- Umagami, K., Remington, A., Lloyd-Evans, B., Davies, J., & Crane, L. (2022). Loneliness in autistic adults : A systematic review. *Autism*, 26(8), 2117-2135.
<https://doi.org/10.1177/13623613221077721>
- van der Aa, C., Pollmann, M. M. H., Plaat, A., & van der Gaag, R. J. (2016). Computer-mediated communication in adults with high-functioning autism spectrum disorders and controls. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 23, 15-27. <https://doi.org/10.1016/j.rasd.2015.11.007>
- Voos, A. C., Pelphrey, K. A., & Kaiser, M. D. (2013). Autistic traits are associated with diminished neural response to affective touch. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 8(4), 378-386. <https://doi.org/10.1093/scan/nss009>
- Westerberg, B., Bäärnhielm, S., Giles, C., Hylén, U., Holländare, F., & Bejerot, S. (2021). An Internet Based Intervention for Adults With Autism Spectrum Disorder—A Qualitative Study of Participants Experiences. *Frontiers in Psychiatry*, 12, 789663.
<https://doi.org/10.3389/fpsy.2021.789663>
- White, H., McConnell, E., Clipp, E., Bynum, L., Teague, C., Navas, L., Craven, S., & Halbrecht, H. (1999). Surfing the Net in Later Life : A Review of the Literature and Pilot Study of Computer Use and Quality of Life. *Journal of Applied Gerontology*, 18(3), 358-378.
<https://doi.org/10.1177/073346489901800306>

5 REFERENCES

- Adhanom, I. B., MacNeilage, P., & Folmer, E. (2023). Eye Tracking in Virtual Reality : A Broad Review of Applications and Challenges. *Virtual Reality*. <https://doi.org/10.1007/s10055-022-00738-z>
- Adrien, J. L., Faure, M., Perrot, A., Hameury, L., Garreau, B., Barthelemy, C., & Sauvage, D. (1991). Autism and family home movies : Preliminary findings. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 21(1), 43-49. <https://doi.org/10.1007/BF02206996>
- Adrien, J. L., Lenoir, P., Martineau, J., Perrot, A., Hameury, L., Larmande, C., & Sauvage, D. (1993). Blind Ratings of Early Symptoms of Autism Based upon Family Home Movies. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 32(3), 617-626. <https://doi.org/10.1097/00004583-199305000-00019>
- Adrien, J.-L., & Gattegno, M. P. (2004). Dépistage précoce de l'autisme à l'aide de films familiaux. Apport de la recherche et d'une démarche rétrospective dans la dynamique de soins. In *Santé mentale du jeune enfant : Prévenir et intervenir* (p. 85-93). Érés. <https://doi.org/10.3917/eres.hadda.2004.01.0085>
- Aguillon-Hernandez, N., Jusiak, R., Latinus, M., & Wardak, C. (2022). COVID-19 masks : A barrier to facial and vocal information. *Frontiers in Neuroscience*, 16, 982899. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.982899>
- Ainsworth, K., Ostrolenk, A., Irion, C., & Bertone, A. (2021). Reduced multisensory facilitation exists at different periods of development in autism. *Cortex*, 134, 195-206. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2020.09.031>
- Aleman, S., Blok, E., Jansen, P. R., Muetzel, R. L., & White, T. (2021). Brain morphology, autistic traits, and polygenic risk for autism : A population-based neuroimaging study. *Autism Research*, 14(10), 2085-2099. <https://doi.org/10.1002/aur.2576>
- Allen, P. G., & Kolers, P. A. (1981). Sensory specificity of apparent motion. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 7(6), 1318-1328. <https://doi.org/10.1037//0096-1523.7.6.1318>
- Almeida, I., Soares, S. C., & Castelo-Branco, M. (2015). The Distinct Role of the Amygdala, Superior Colliculus and Pulvinar in Processing of Central and Peripheral Snakes. *PLOS ONE*, 10(6), e0129949. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129949>
- Ambadar, Z., Schooler, J. W., & Cohn, J. F. (2005). Deciphering the enigmatic face : The importance of facial dynamics in interpreting subtle facial expressions. *Psychological Science*, 16(5), 403-410. <https://doi.org/10.1111/j.0956-7976.2005.01548.x>
- Anagnostou, E., & Taylor, M. J. (2011). Review of neuroimaging in autism spectrum disorders : What have we learned and where we go from here. *Molecular Autism*, 2(1), 4. <https://doi.org/10.1186/2040-2392-2-4>
- Angelaki, D. E., Gu, Y., & Deangelis, G. C. (2011). Visual and vestibular cue integration for heading perception in extrastriate visual cortex. *The Journal of Physiology*, 589(Pt 4), 825-833. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2010.194720>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s10803-011-1256-3>
- APA. (2013). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders (DSM-5)*. American Psychiatric Association, Washington, DC.
- Arrighi, R., Marini, F., & Burr, D. (2009). Meaningful auditory information enhances perception of visual biological motion. *Journal of Vision*, 9(4), 25. <https://doi.org/10.1167/9.4.25>
- Asada, K., Tojo, Y., Osanai, H., Saito, A., Hasegawa, T., & Kumagaya, S. (2016). Reduced Personal Space in Individuals with Autism Spectrum Disorder. *PLOS ONE*, 11(1), e0146306. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0146306>
- Attwood, T. (1998). *Asperger's syndrome*. London: Jessica Kingsley.
- Ausderau, K. K., Furlong, M., Sideris, J., Bulluck, J., Little, L. M., Watson, L. R., Boyd, B. A., Belger, A., Dickie, V. A., & Baranek, G. T. (2014). Sensory subtypes in children with autism spectrum disorder : Latent profile transition analysis using a national survey of sensory features. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 55(8), 935-944. <https://doi.org/10.1111/jcpp.12219>

- Ayres, A. J. (1979). *Sensory Integration and the Child*. Los Angeles, CA: Western Psychological Services.
- Bach, D. R., Neuhoff, J. G., Perrig, W., & Seifritz, E. (2009). Looming sounds as warning signals : The function of motion cues. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, 74(1), 28-33. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2009.06.004>
- Bahrnick, L. E. (2001). Increasing specificity in perceptual development : Infants' detection of nested levels of multimodal stimulation. *Journal of Experimental Child Psychology*, 79(3), 253-270. <https://doi.org/10.1006/jecp.2000.2588>
- Bahrnick, L. E., Flom, R., & Lickliter, R. (2002). Intersensory redundancy facilitates discrimination of tempo in 3-month-old infants. *Developmental Psychobiology*, 41(4), 352-363. <https://doi.org/10.1002/dev.10049>
- Bahrnick, L. E., & Lickliter, R. (2000). Intersensory redundancy guides attentional selectivity and perceptual learning in infancy. *Developmental Psychology*, 36(2), 190-201. <https://doi.org/10.1037//0012-1649.36.2.190>
- Bailey, A., Le Couteur, A., Gottesman, I., Bolton, P., Simonoff, E., Yuzda, E., & Rutter, M. (1995). Autism as a strongly genetic disorder : Evidence from a British twin study. *Psychological Medicine*, 25(1), 63-77. <https://doi.org/10.1017/s0033291700028099>
- Baker, A. E. Z., Lane, A., Angley, M. T., & Young, R. L. (2008). The Relationship Between Sensory Processing Patterns and Behavioural Responsiveness in Autistic Disorder : A Pilot Study. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 38(5), 867-875. <https://doi.org/10.1007/s10803-007-0459-0>
- Baksh, R. A., Abrahams, S., Auyeung, B., & MacPherson, S. E. (2018). The Edinburgh Social Cognition Test (ESCoT) : Examining the effects of age on a new measure of theory of mind and social norm understanding. *PloS One*, 13(4), e0195818. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195818>
- Ball, W., & Tronick, E. (1971). Infant responses to impending collision : Optical and real. *Science*, 171, 818-820. <https://doi.org/10.1126/science.171.3973.818>
- Baranek, G. T. (1999). Autism during infancy : A retrospective video analysis of sensory-motor and social behaviors at 9-12 months of age. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 29(3), 213-224. <https://doi.org/10.1023/a:1023080005650>
- Baranek, G. T., David, F. J., Poe, M. D., Stone, W. L., & Watson, L. R. (2006). Sensory Experiences Questionnaire : Discriminating sensory features in young children with autism, developmental delays, and typical development. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 47(6), 591-601. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2005.01546.x>
- Baranek, G. T., Watson, L. R., Boyd, B. A., Poe, M. D., David, F. J., & McGuire, L. (2013). Hyporesponsiveness to social and nonsocial sensory stimuli in children with autism, children with developmental delays, and typically developing children. *Development and Psychopathology*, 25(2), 307-320. <https://doi.org/10.1017/S0954579412001071>
- Baron-Cohen, S., Wheelwright, S., Skinner, R., Martin, J., & Clubley, E. (2001). The autism-spectrum quotient (AQ) : Evidence from Asperger syndrome/high-functioning autism, males and females, scientists and mathematicians. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 31(1), 5-17. <https://doi.org/10.1023/A:1005653411471>
- Barth, D. S., Goldberg, N., Brett, B., & Di, S. (1995). The spatiotemporal organization of auditory, visual, and auditory-visual evoked potentials in rat cortex. *Brain Research*, 678(1-2), 177-190. [https://doi.org/10.1016/0006-8993\(95\)00182-p](https://doi.org/10.1016/0006-8993(95)00182-p)
- Barutchu, A., Crewther, D. P., & Crewther, S. G. (2009). The race that precedes coactivation : Development of multisensory facilitation in children. *Developmental Science*, 12(3), 464-473. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00782.x>
- Batty, M., Meaux, E., Wittemeyer, K., Rogé, B., & Taylor, M. J. (2011). Early processing of emotional faces in children with autism : An event-related potential study. *Journal of Experimental Child Psychology*, 109(4), 430-444. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2011.02.001>
- Bayliss, A. P., & Tipper, S. P. (2005). Gaze and arrow cueing of attention reveals individual differences along the autism spectrum as a function of target context. *British Journal of Psychology*, 96(1), 95-114. <https://doi.org/10.1348/000712604X15626>

- Bebko, J. M., Schroeder, J. H., & Weiss, J. A. (2014). The McGurk effect in children with autism and Asperger syndrome. *Autism Research: Official Journal of the International Society for Autism Research*, 7(1), 50-59. <https://doi.org/10.1002/aur.1343>
- Becker, E. B. E., & Stoodley, C. J. (2013). Autism spectrum disorder and the cerebellum. *International Review of Neurobiology*, 113, 1-34. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-418700-9.00001-0>
- Ben-Sasson, A., Cermak, S. A., Orsmond, G. I., Tager-Flusberg, H., Carter, A. S., Kadlec, M. B., & Dunn, W. (2007). Extreme sensory modulation behaviors in toddlers with autism spectrum disorders. *The American Journal of Occupational Therapy: Official Publication of the American Occupational Therapy Association*, 61(5), 584-592. <https://doi.org/10.5014/ajot.61.5.584>
- Ben-Sasson, A., Hen, L., Fluss, R., Cermak, S. A., Engel-Yeger, B., & Gal, E. (2009). A Meta-Analysis of Sensory Modulation Symptoms in Individuals with Autism Spectrum Disorders. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 39(1), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s10803-008-0593-3>
- Berman, A. L. (1961). INTERACTION OF CORTICAL RESPONSES TO SOMATIC AND AUDITORY STIMULI IN ANTERIOR ECTOSYLVIAN GYRUS OF CAT. *Journal of Neurophysiology*, 24(6), 608-620. <https://doi.org/10.1152/jn.1961.24.6.608>
- Bertelson, P., & Radeau, M. (1981). Cross-modal bias and perceptual fusion with auditory-visual spatial discordance. *Perception & Psychophysics*, 29, 578-584. <https://doi.org/10.3758/BF03207374>
- Bertone, A., Mottron, L., Jelenic, P., & Faubert, J. (2003). Motion Perception in Autism : A "Complex" Issue. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(2), 218-225. <https://doi.org/10.1162/089892903321208150>
- Bezemer, M. L., Blijd-Hoogewys, E. M. A., & Meek-Heekelaar, M. (2021). The Predictive Value of the AQ and the SRS-A in the Diagnosis of ASD in Adults in Clinical Practice. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 51(7), 2402-2415. <https://doi.org/10.1007/s10803-020-04699-7>
- Biele, C., & Grabowska, A. (2006). Sex differences in perception of emotion intensity in dynamic and static facial expressions. *Experimental Brain Research*, 171(1), 1-6. <https://doi.org/10.1007/s00221-005-0254-0>
- Birch, J. (2003). *Congratulations ! It's Asperger Syndrome*. Jessica Kingsley Publishers.
- Bishop, M., Hobson, R. P., & Lee, A. (2005). Symbolic play in congenitally blind children. *Development and Psychopathology*, 17(2), 447-465. <https://doi.org/10.1017/s0954579405050212>
- Blake, R., & Shiffrar, M. (2007). Perception of Human Motion. *Annual Review of Psychology*, 58(1), 47-73. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.57.102904.190152>
- Bleuler, E. (1911). *Dementia praecox ou groupe des schizophrénies*. (Ed. 1993). Paris Clichy: Epel.
- Blouin, J., Bard, C., Teasdale, N., & Fleury, M. (1993). On-Line versus Off-Line Control of Rapid Aiming Movements. *Journal of Motor Behavior*, 25(4), 275-279. <https://doi.org/10.1080/00222895.1993.9941648>
- Bodfish, J. W., Symons, F. J., Parker, D. E., & Lewis, M. H. (2000). Varieties of repetitive behavior in autism : Comparisons to mental retardation. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 30(3), 237-243. <https://doi.org/10.1023/a:1005596502855>
- Bonnel, A., Mottron, L., Peretz, I., Trudel, M., Gallun, E., & Bonnel, A.-M. (2003). Enhanced pitch sensitivity in individuals with autism : A signal detection analysis. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(2), 226-235. <https://doi.org/10.1162/089892903321208169>
- Bourreau, Y., Gomot, M., Roux, S. & Barthélémy, C. (2005). Construction d'une échelle d'évaluation des comportements répétitifs et restreints dans l'autisme (EC2R). *Journal de Thérapie Comportementale et Cognitive*, 15 (HS1), 32-37.
- Bower, T. G. R., Broughton, J. M., & Moore, M. K. (1971). Infant responses to approaching objects : An indicator of response to distal variables. *Perception & Psychophysics*, 9(2), 193-196. <https://doi.org/10.3758/BF03212627>
- Boyd, B. A., Baranek, G. T., Sideris, J., Poe, M. D., Watson, L. R., Patten, E., & Miller, H. (2010). Sensory features and repetitive behaviors in children with autism and developmental delays. *Autism Research: Official Journal of the International Society for Autism Research*, 3(2), 78-87. <https://doi.org/10.1002/aur.124>
- Brandwein, A. B., Foxe, J. J., Butler, J. S., Frey, H.-P., Bates, J. C., Shulman, L. H., & Molholm, S. (2015). Neurophysiological Indices of Atypical Auditory Processing and Multisensory

- Integration are Associated with Symptom Severity in Autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 45(1), 230-244. <https://doi.org/10.1007/s10803-014-2212-9>
- Brandwein, A. B., Foxe, J. J., Butler, J. S., Russo, N. N., Altschuler, T. S., Gomes, H., & Molholm, S. (2013). The Development of Multisensory Integration in High-Functioning Autism: High-Density Electrical Mapping and Psychophysical Measures Reveal Impairments in the Processing of Audiovisual Inputs. *Cerebral Cortex*, 23(6), 1329-1341. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhs109>
- Brandwein, A. B., Foxe, J. J., Russo, N. N., Altschuler, T. S., Gomes, H., & Molholm, S. (2011). The Development of Audiovisual Multisensory Integration Across Childhood and Early Adolescence: A High-Density Electrical Mapping Study. *Cerebral Cortex*, 21(5), 1042-1055. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhq170>
- Braun, C. (1997). De la validité écologique en neuropsychologie.
- Brooks, A., van der Zwan, R., Billard, A., Petreska, B., Clarke, S., & Blanke, O. (2007). Auditory motion affects visual biological motion processing. *Neuropsychologia*, 45(3), 523-530. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2005.12.012>
- Brown, A. C., Chouinard, P. A., & Crewther, S. G. (2017). Vision Research Literature May Not Represent the Full Intellectual Range of Autism Spectrum Disorder. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnhum.2017.00057>
- Brown, C., Gruber, T., Boucher, J., Rippon, G., & Brock, J. (2005). Gamma abnormalities during perception of illusory figures in autism. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 41(3), 364-376. [https://doi.org/10.1016/s0010-9452\(08\)70273-9](https://doi.org/10.1016/s0010-9452(08)70273-9)
- Brozzoli, C., Pavani, F., Urquizar, C., Cardinali, L., & Farnè, A. (2009). Grasping actions remap peripersonal space. *Neuroreport*, 20(10), 913-917. <https://doi.org/10.1097/WNR.0b013e32832c0b9b>
- Bruneau, N., Roux, S., Adrien, J. L., & Barthélémy, C. (1999). Auditory associative cortex dysfunction in children with autism: Evidence from late auditory evoked potentials (N1 wave-T complex). *Clinical Neurophysiology: Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 110(11), 1927-1934. [https://doi.org/10.1016/s1388-2457\(99\)00149-2](https://doi.org/10.1016/s1388-2457(99)00149-2)
- Brunswik, E. (1955). Representative design and probabilistic theory in a functional psychology. *Psychological Review*, 62(3), 193-217. <https://doi.org/10.1037/h0047470>
- Burr, D., & Gori, M. (2012). Multisensory Integration Develops Late in Humans. In M. M. Murray & M. T. Wallace (Éds.), *The Neural Bases of Multisensory Processes*. CRC Press/Taylor & Francis. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK92864/>
- Buzsáki, G., Anastassiou, C. A., & Koch, C. (2012). The origin of extracellular fields and currents—EEG, ECoG, LFP and spikes. *Nature Reviews. Neuroscience*, 13(6), 407-420. <https://doi.org/10.1038/nrn3241>
- Calvert, G. A. (2001). Crossmodal processing in the human brain: Insights from functional neuroimaging studies. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, 11(12), 1110-1123. <https://doi.org/10.1093/cercor/11.12.1110>
- Calvert, G. A., & Thesen, T. (2004). Multisensory integration: Methodological approaches and emerging principles in the human brain. *Journal of Physiology-Paris*, 98(1-3), 191-205. <https://doi.org/10.1016/j.jphysparis.2004.03.018>
- Campanella, S., & Belin, P. (2007). Integrating face and voice in person perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(12), 535-543. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2007.10.001>
- Camponogara, I., & Volcic, R. (2019). Grasping adjustments to haptic, visual, and visuo-haptic object perturbations are contingent on the sensory modality. *Journal of Neurophysiology*, 122(6), 2614-2620. <https://doi.org/10.1152/jn.00452.2019>
- Camponogara, I., & Volcic, R. (2021). Integration of haptics and vision in human multisensory grasping. *Cortex*, 135, 173-185. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2020.11.012>
- Cappe, C., & Barone, P. (2005). Heteromodal connections supporting multisensory integration at low levels of cortical processing in the monkey. *The European Journal of Neuroscience*, 22(11), 2886-2902. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2005.04462.x>
- Cappe, C., Morel, A., Barone, P., & Rouiller, E. M. (2009). The Thalamocortical Projection Systems in Primate: An Anatomical Support for Multisensory and Sensorimotor Interplay. *Cerebral Cortex*, 19(9), 2025-2037. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhn228>

- Cappe, C., Rouiller, E. M., & Barone, P. (2009). Multisensory anatomical pathways. *Hearing Research*, 258(1-2), 28-36. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2009.04.017>
- Cappe, C., Thelen, A., Romei, V., Thut, G., & Murray, M. M. (2012). Looming Signals Reveal Synergistic Principles of Multisensory Integration. *Journal of Neuroscience*, 32(4), 1171-1182. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5517-11.2012>
- Cappe, C., Thut, G., Romei, V., & Murray, M. M. (2009). Selective integration of auditory-visual looming cues by humans. *Neuropsychologia*, 47(4), 1045-1052. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2008.11.003>
- Cappe, C., Thut, G., Romei, V., & Murray, M. M. (2010). Auditory-Visual Multisensory Interactions in Humans : Timing, Topography, Directionality, and Sources. *Journal of Neuroscience*, 30(38), 12572-12580. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1099-10.2010>
- Casanova, M. F., van Kooten, I. A. J., Switala, A. E., van Engeland, H., Heinsen, H., Steinbusch, H. W. M., Hof, P. R., Trippe, J., Stone, J., & Schmitz, C. (2006). Minicolumnar abnormalities in autism. *Acta Neuropathologica*, 112(3), 287-303. <https://doi.org/10.1007/s00401-006-0085-5>
- 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. <https://doi.org/10.1002/aur.2170>
- Centelles, L., Assaiante, C., Etchegoyhen, K., Bouvard, M., & Schmitz, C. (2013). From action to interaction : Exploring the contribution of body motion cues to social understanding in typical development and in autism spectrum disorders. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 43(5), 1140-1150. <https://doi.org/10.1007/s10803-012-1655-0>
- Chakrabarti, B. (2017). Commentary : Critical considerations for studying low-functioning autism. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 58(4), 436-438. <https://doi.org/10.1111/jcpp.12720>
- Chamak, B., Bonniau, B., Jaunay, E., & Cohen, D. (2008). What can we learn about autism from autistic persons? *Psychotherapy and Psychosomatics*, 77(5), 271-279. <https://doi.org/10.1159/000140086>
- Chang, J., Gilman, S. R., Chiang, A. H., Sanders, S. J., & Vitkup, D. (2015). Genotype to phenotype relationships in autism spectrum disorders. *Nature Neuroscience*, 18(2), 191-198. <https://doi.org/10.1038/nn.3907>
- Chen, Y.-H., Rodgers, J., & McConachie, H. (2009). Restricted and Repetitive Behaviours, Sensory Processing and Cognitive Style in Children with Autism Spectrum Disorders. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 39(4), 635-642. <https://doi.org/10.1007/s10803-008-0663-6>
- Cheng, Z., & Gu, Y. (2018). Vestibular System and Self-Motion. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, 12, 456. <https://doi.org/10.3389/fncel.2018.00456>
- Chisholm, K., Lin, A., Abu-Akel, A., & Wood, S. J. (2015). The association between autism and schizophrenia spectrum disorders : A review of eight alternate models of co-occurrence. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 55, 173-183. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2015.04.012>
- Clark, A. I., Hughes, P. S., Grube, M., & Stewart, M. E. (2013). Autistic Traits and Sensitivity to Interference With Flavour Identification : Autistic traits and flavour perception. *Autism Research*, 6(5), 332-336. <https://doi.org/10.1002/aur.1293>
- Cléry, H., Bonnet-Brilhault, F., Lenoir, P., Barthelemy, C., Bruneau, N., & Gomot, M. (2013). Atypical visual change processing in children with autism : An electrophysiological Study: Visual mismatch response in children with autism. *Psychophysiology*, 50(3), 240-252. <https://doi.org/10.1111/psyp.12006>
- Cléry, J., & Hamed, S. B. (2018). Frontier of Self and Impact Prediction. *Frontiers in Psychology*, 9, 1073. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01073>
- Cohen, M. X. (2011). It's about Time. *Frontiers in Human Neuroscience*, 5. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2011.00002>
- Collignon, O., Charbonneau, G., Peters, F., Nassim, M., Lassonde, M., Lepore, F., Mottron, L., & Bertone, A. (2013). Reduced multisensory facilitation in persons with autism. *Cortex*, 49(6), 1704-1710. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2012.06.001>

- Constantino, J. N. (2013). Social Responsiveness Scale. In F. R. Volkmar (Éd.), *Encyclopedia of Autism Spectrum Disorders* (p. 2919-2929). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1698-3_296
- Constantino, J. N., Przybeck, T., Friesen, D., & Todd, R. D. (2000). Reciprocal social behavior in children with and without pervasive developmental disorders. *Journal of Developmental and Behavioral Pediatrics: JDBP*, 21(1), 2-11. <https://doi.org/10.1097/00004703-200002000-00002>
- Constantino, J. N., & Todd, R. D. (2005). Intergenerational transmission of subthreshold autistic traits in the general population. *Biological psychiatry*, 57(6), 655–660. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2004.12.014>
- Constantino, J. N., Davis, S. A., Todd, R. D., Schindler, M. K., Gross, M. M., Brophy, S. L., Metzger, L. M., Shoushtari, C. S., Splinter, R., & Reich, W. (2003). Validation of a brief quantitative measure of autistic traits: comparison of the social responsiveness scale with the autism diagnostic interview-revised. *Journal of autism and developmental disorders*, 33(4), 427–433. <https://doi.org/10.1023/a:1025014929212>
- Courchesne, E., Campbell, K., & Solso, S. (2011). Brain growth across the life span in autism : Age-specific changes in anatomical pathology. *Brain Research*, 1380, 138-145. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2010.09.101>
- Courchesne, E., Mouton, P. R., Calhoun, M. E., Semendeferi, K., Ahrens-Barbeau, C., Hallet, M. J., Barnes, C. C., & Pierce, K. (2011). Neuron number and size in prefrontal cortex of children with autism. *JAMA*, 306(18), 2001-2010. <https://doi.org/10.1001/jama.2011.1638>
- Courchesne, E., Yeung-Courchesne, R., Press, G. A., Hesselink, J. R., & Jernigan, T. L. (1988). Hypoplasia of cerebellar vermal lobules VI and VII in autism. *The New England Journal of Medicine*, 318(21), 1349-1354. <https://doi.org/10.1056/NEJM198805263182102>
- Courtin, C. (2000). The impact of sign language on the cognitive development of deaf children : The case of theories of mind. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 5(3), 266-276. <https://doi.org/10.1093/deafed/5.3.266>
- Crane, L., Goddard, L., & Pring, L. (2009). Sensory processing in adults with autism spectrum disorders. *Autism*, 13(3), 215-228. <https://doi.org/10.1177/1362361309103794>
- Dahlgren, S. O., & Gillberg, C. (1989). Symptoms in the first two years of life. A preliminary population study of infantile autism. *European Archives of Psychiatry and Neurological Sciences*, 238(3). <https://doi.org/10.1007/BF00451006>
- Davis, H., Davis, P. A., Loomis, A. L., Hervey, E. N., & Hobart, G. (1939). Electrical reactions of the human brain to auditory stimulation during sleep. *Journal of Neurophysiology*, 2, 500-514.
- Dawson, G., Meltzoff, A. N., Osterling, J., Rinaldi, J., & Brown, E. (1998). Children with autism fail to orient to naturally occurring social stimuli. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 28(6), 479-485. <https://doi.org/10.1023/a:1026043926488>
- Dawson, G., Toth, K., Abbott, R., Osterling, J., Munson, J., Estes, A., & Liaw, J. (2004). Early social attention impairments in autism : Social orienting, joint attention, and attention to distress. *Developmental Psychology*, 40(2), 271-283. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.40.2.271>
- Dawson, G., & Watling, R. (2000). Interventions to facilitate auditory, visual, and motor integration in autism : A review of the evidence. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 30(5), 415-421. <https://doi.org/10.1023/a:1005547422749>
- de Boer-Schellekens, L., Eussen, M., & Vroomen, J. (2013). Diminished sensitivity of audiovisual temporal order in autism spectrum disorder. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 7. <https://doi.org/10.3389/fnint.2013.00008>
- Degenne, C., Serres, J., Gattegno, M. P., & Adrien, J.-L. (2009). Etude préliminaire des troubles des interactions et de la motricité chez des bébés âgés de quelques jours à 6 mois et présentant ultérieurement un trouble autistique. Analyse microscopique avec échantillonnage temporel, à l'aide d'un logiciel, the Observer, à partir de films familiaux. *Devenir*, 21(4), 265-294. <https://doi.org/10.3917/dev.094.0265>
- Delacato, C. H. (1974). *The ultimate stranger : The autistic child* (p. 226). Doubleday.
- Derakhshanrad, S. A., Piven, E., & Zeynalzadeh Ghoochani, B. (2022). The relationship between sensory experiences and social functioning in children with autism spectrum disorder. *International Journal of Developmental Disabilities*, 0(0), 1-9. <https://doi.org/10.1080/20473869.2022.2128553>

- Desgranges, B., Laisney, M., Bon, L., Duval, C., Mondou, A., Bejanin, A., Fliss, R., Beaunieux, H., Eustache, F., & Muckle, G. (2012). TOM-15 : Une épreuve de fausses croyances pour évaluer la théorie de l'esprit cognitive. *Revue de neuropsychologie*, 4(3), 216-220. <https://doi.org/10.1684/nrp.2012.0232>
- Diagnostic and statistical manual of mental disorders, 4th ed (p. xxvii, 886). (1994). American Psychiatric Publishing, Inc.
- Dichgans, J., Diener, H. C., & Brandt, T. (1974). Optokinetic-graviceptive interaction in different head positions. *Acta Oto-Laryngologica*, 78(5-6), 391-398. <https://doi.org/10.3109/00016487409126371>
- Dionne-Dostie, E., Paquette, N., Lassonde, M., & Gallagher, A. (2015). Multisensory Integration and Child Neurodevelopment. *Brain Sciences*, 5(1), 32-57. <https://doi.org/10.3390/brainsci5010032>
- Dodd, B. (1979). Lip reading in infants : Attention to speech presented in- and out-of-synchrony. *Cognitive Psychology*, 11(4), 478-484. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(79\)90021-5](https://doi.org/10.1016/0010-0285(79)90021-5)
- Donchin, E., Tueting, P., Ritter, W., Kutas, M., & Heffley, E. (1975). On the independence of the CNV and the P300 components of the human averaged evoked potential. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 38(5), 449-461. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(75\)90187-X](https://doi.org/10.1016/0013-4694(75)90187-X)
- Donkers, F. C. L., Carlson, M., Schipul, S. E., Belger, A., & Baranek, G. T. (2020). Auditory Event-Related Potentials and Associations with Sensory Patterns in Children with Autism Spectrum Disorder, Developmental Delay, and Typical Development. *Autism : the international journal of research and practice*, 24(5), 1093-1110. <https://doi.org/10.1177/1362361319893196>
- Donohue, S. E., Darling, E. F., & Mitroff, S. R. (2012). Links between multisensory processing and autism. *Experimental Brain Research*, 222(4), 377-387. <https://doi.org/10.1007/s00221-012-3223-4>
- Donovan, A. P. A., & Basson, M. A. (2017). The neuroanatomy of autism—A developmental perspective. *Journal of Anatomy*, 230(1), 4-15. <https://doi.org/10.1111/joa.12542>
- Dwyer, P., Takarae, Y., Zadeh, I., Rivera, S. M., & Saron, C. D. (2022). Multisensory integration and interactions across vision, hearing, and somatosensation in autism spectrum development and typical development. *Neuropsychologia*, 175, 108340. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2022.108340>
- Dyck, M. J., Farrugia, C., Shochet, I. M., & Holmes-Brown, M. (2004). Emotion recognition/understanding ability in hearing or vision-impaired children : Do sounds, sights, or words make the difference? *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 45(4), 789-800. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2004.00272.x>
- Eapen, V., & Clarke, R. A. (2014). Autism spectrum disorders : From genotypes to phenotypes. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 914. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00914>
- Ehrenstein, W. H., & Reinhardt-Rutland, A. H. (1996). A Cross-Modal Aftereffect : Auditory Displacement following Adaptation to Visual Motion. *Perceptual and Motor Skills*, 82(1), 23-26. <https://doi.org/10.2466/pms.1996.82.1.23>
- Elliott, D., & Madalena, J. (1987). The influence of premovement visual information on manual aiming. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 39(3), 541-559. <https://doi.org/10.1080/14640748708401802>
- Ettlenger, G. (1990). « Object vision » and « spatial vision » : The neuropsychological evidence for the distinction. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 26(3), 319-341. [https://doi.org/10.1016/s0010-9452\(13\)80084-6](https://doi.org/10.1016/s0010-9452(13)80084-6)
- Fahle, M., & Wehrhahn, C. (1991). Motion perception in the peripheral visual field. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 229(5), 430-436. <https://doi.org/10.1007/BF00166305>
- Falck-Ytter, T., Bölte, S., & Gredebäck, G. (2013). Eye tracking in early autism research. *Journal of Neurodevelopmental Disorders*, 5, 1-13.
- Fatemi, S. H., Aldinger, K. A., Ashwood, P., Bauman, M. L., Blaha, C. D., Blatt, G. J., Chauhan, A., Chauhan, V., Dager, S. R., Dickson, P. E., Estes, A. M., Goldowitz, D., Heck, D. H., Kemper, T. L., King, B. H., Martin, L. A., Millen, K. J., Mittleman, G., Mosconi, M. W., ... Welsh, J. P. (2012). Consensus paper : Pathological role of the cerebellum in autism. *Cerebellum (London, England)*, 11(3), 777-807. <https://doi.org/10.1007/s12311-012-0355-9>

- Feldman, J. I., Cassidy, M., Liu, Y., Kirby, A. V., Wallace, M. T., & Woynaroski, T. G. (2020). Relations between Sensory Responsiveness and Features of Autism in Children. *Brain Sciences*, 10(11), E775. <https://doi.org/10.3390/brainsci10110775>
- Feldman, J. I., Dunham, K., Cassidy, M., Wallace, M. T., Liu, Y., & Woynaroski, T. G. (2018). Audiovisual multisensory integration in individuals with autism spectrum disorder: A systematic review and meta-analysis. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 95, 220-234. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2018.09.020>
- Folstein, S., & Rutter, M. (1977). Infantile autism: A genetic study of 21 twin pairs. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 18(4), 297-321. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1977.tb00443.x>
- Forster, B., Cavina-Pratesi, C., Aglioti, S. M., & Berlucchi, G. (2002). Redundant target effect and intersensory facilitation from visual-tactile interactions in simple reaction time. *Experimental Brain Research*, 143(4), 480-487. <https://doi.org/10.1007/s00221-002-1017-9>
- Fort, A., Delpuech, C., Pernier, J., & Giard, M.-H. (2002). Early auditory-visual interactions in human cortex during nonredundant target identification. *Cognitive Brain Research*, 14(1), 20-30. [https://doi.org/10.1016/S0926-6410\(02\)00058-7](https://doi.org/10.1016/S0926-6410(02)00058-7)
- Foss-Feig, J. H., Kwakye, L. D., Cascio, C. J., Burnette, C. P., Kadivar, H., Stone, W. L., & Wallace, M. T. (2010). An extended multisensory temporal binding window in autism spectrum disorders. *Experimental Brain Research*, 203(2), 381-389. <https://doi.org/10.1007/s00221-010-2240-4>
- Foxe, J. J., Molholm, S., Del Bene, V. A., Frey, H.-P., Russo, N. N., Blanco, D., Saint-Amour, D., & Ross, L. A. (2015). Severe Multisensory Speech Integration Deficits in High-Functioning School-Aged Children with Autism Spectrum Disorder (ASD) and Their Resolution During Early Adolescence. *Cerebral Cortex*, 25(2), 298-312. <https://doi.org/10.1093/cercor/bht213>
- Foxe, J. J., Morocz, I. A., Murray, M. M., Higgins, B. A., Javitt, D. C., & Schroeder, C. E. (2000). Multisensory auditory-somatosensory interactions in early cortical processing revealed by high-density electrical mapping. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, 10(1-2), 77-83. [https://doi.org/10.1016/s0926-6410\(00\)00024-0](https://doi.org/10.1016/s0926-6410(00)00024-0)
- Frazier, T. W., & Hardan, A. Y. (2009). A Meta-Analysis of the Corpus Callosum in Autism. *Biological psychiatry*, 66(10), 935-941. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2009.07.022>
- Freitag, C. M., Konrad, C., Häberlen, M., Kleser, C., von Gontard, A., Reith, W., Troje, N. F., & Krick, C. (2008). Perception of biological motion in autism spectrum disorders. *Neuropsychologia*, 46(5), 1480-1494. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2007.12.025>
- Fries, W. (1984). Cortical projections to the superior colliculus in the macaque monkey: A retrograde study using horseradish peroxidase. *The Journal of Comparative Neurology*, 230(1), 55-76. <https://doi.org/10.1002/cne.902300106>
- Gabriels, R. L., Agnew, J. A., Miller, L. J., Gralla, J., Pan, Z., Goldson, E., Ledbetter, J. C., Dinkins, J. P., & Hooks, E. (2008). Is there a relationship between restricted, repetitive, stereotyped behaviors and interests and abnormal sensory response in children with autism spectrum disorders? *Research in Autism Spectrum Disorders*, 2(4), 660-670. <https://doi.org/10.1016/j.rasd.2008.02.002>
- Gelder, B. de, Vroomen, J., & van der Heide, L. (1991). Face recognition and lip-reading in autism. *European Journal of Cognitive Psychology*, 3(1), 69-86. <https://doi.org/10.1080/09541449108406220>
- Gepner, B. (2006). Constellation autistique, mouvement, temps et pensée: Malvoyance de l'É-Motion, autres désordres du traitement temporo-spatial des flux sensoriels et dyssynchronie dans l'autisme. *Devenir*, 18(4), 333. <https://doi.org/10.3917/dev.064.0333>
- Gepner, B., Charrier, A., Arciszewski, T., & Tardif, C. (2022). Slowness Therapy for Children with Autism Spectrum Disorder: A Blind Longitudinal Randomized Controlled Study. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 52(7), 3102-3115. <https://doi.org/10.1007/s10803-021-05183-6>
- Gepner, B., & Féron, F. (2009). Autism: A world changing too fast for a mis-wired brain? *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 33(8), 1227-1242. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.06.006>

- Gepner, B., & Mestre, D. R. (2002). Brief report : Postural reactivity to fast visual motion differentiates autistic from children with Asperger syndrome. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 32(3), 231-238. <https://doi.org/10.1023/a:1015410015859>
- Gernsbacher, M. A., Stevenson, J. L., & Dern, S. (2017). Specificity, contexts, and reference groups matter when assessing autistic traits. *PLOS ONE*, 12(2), e0171931. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171931>
- Gepner, B., Lainé, F., & Tardif, C. (2010). Désordres de la constellation autistique : Un monde trop rapide pour un cerveau disconnecté ? *PSN*, 8(2), 67-76. <https://doi.org/10.1007/s11836-010-0126-y>
- Geschwind, D. H., & Levitt, P. (2007). Autism spectrum disorders : Developmental disconnection syndromes. *Current Opinion in Neurobiology*, 17(1), 103-111. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2007.01.009>
- Gessaroli, E., Santelli, E., Di Pellegrino, G., & Frassinetti, F. (2013). Personal Space Regulation in Childhood Autism Spectrum Disorders. *PLoS ONE*, 8(9), e74959. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0074959>
- Ghazanfar, A. A., Maier, J. X., Hoffman, K. L., & Logothetis, N. K. (2005). Multisensory Integration of Dynamic Faces and Voices in Rhesus Monkey Auditory Cortex. *Journal of Neuroscience*, 25(20), 5004-5012. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0799-05.2005>
- Ghazanfar, A., & Schroeder, C. (2006). Is neocortex essentially multisensory? *Trends in Cognitive Sciences*, 10(6), 278-285. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2006.04.008>
- Giard, M. H., & Peronnet, F. (1999). Auditory-visual integration during multimodal object recognition in humans : A behavioral and electrophysiological study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 11(5), 473-490. <https://doi.org/10.1162/089892999563544>
- Gilbert, G. M. (1939). Dynamic psychophysics and the phi phenomenon. *Archives of Psychology (Columbia University)*, 237, 43-43.
- Giray, M., & Ulrich, R. (1993). Motor coactivation revealed by response force in divided and focused attention. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 19(6), 1278-1291. <https://doi.org/10.1037//0096-1523.19.6.1278>
- Gliga, T., Bedford, R., Charman, T., Johnson, M. H., Baron-Cohen, S., Bolton, P., Cheung, C., Davies, K., Liew, M., Fernandes, J., Gammer, I., Maris, H., Salomone, E., Pasco, G., Pickles, A., Ribeiro, H., & Tucker, L. (2015). Enhanced Visual Search in Infancy Predicts Emerging Autism Symptoms. *Current Biology*, 25(13), 1727-1730. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.05.011>
- Gomot, M., Blanc, R., Clery, H., Roux, S., Barthelemy, C., & Bruneau, N. (2011). Candidate electrophysiological endophenotypes of hyper-reactivity to change in autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 41(6), 705-714. <https://doi.org/10.1007/s10803-010-1091-y>
- Gondan, M., & Minakata, K. (2016). A tutorial on testing the race model inequality. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 78(3), 723-735. <https://doi.org/10.3758/s13414-015-1018-y>
- Gori, M., Sandini, G., Martinoli, C., & Burr, D. (2010). Poor haptic orientation discrimination in nonsighted children may reflect disruption of cross-sensory calibration. *Current Biology: CB*, 20(3), 223-225. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.11.069>
- Goris, J., Brass, M., Cambier, C., Delplanque, J., Wiersema, J. R., & Braem, S. (2020). The Relation Between Preference for Predictability and Autistic Traits. *Autism Research*, 13(7), 1144-1154. <https://doi.org/10.1002/aur.2244>
- Grandin, T. (1995). *Ma vie d'autiste*. Odile Jacob.
- Grandin, T. (1997). *Penser en images*. Odile Jacob.
- Grant, P. (2015). Is Schizotypy per se a Suitable Endophenotype of Schizophrenia? – Do Not Forget to Distinguish Positive from Negative Facets. *Frontiers in Psychiatry*, 6. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsy.2015.00143>
- Green, S., Pring, L., & Swettenham, J. (2004). An investigation of first-order false belief understanding of children with congenital profound visual impairment. *British Journal of Developmental Psychology*, 22, 1-17. <https://doi.org/10.1348/026151004772901087>
- Greffou, S., Bertone, A., Hahler, E.-M., Hanssens, J.-M., Mottron, L., & Faubert, J. (2012). Postural Hypo-Reactivity in Autism is Contingent on Development and Visual Environment : A Fully Immersive Virtual Reality Study. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 42(6), 961-970. <https://doi.org/10.1007/s10803-011-1326-6>

- Grinter, E. J., Van Beek, P. L., Maybery, M. T., & Badcock, D. R. (2009). Brief report : Visuospatial analysis and self-rated autistic-like traits. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 39(4), 670-677. <https://doi.org/10.1007/s10803-008-0658-3>
- Guérit, J. M. (1993). *Les potentielles évoqués* (Masson, Paris).
- Haar, S., Berman, S., Behrmann, M., & Dinstein, I. (2016). Anatomical Abnormalities in Autism? *Cerebral Cortex* (New York, N.Y.: 1991), 26(4), 1440-1452. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhu242>
- Hall, G. B. C., Szechtman, H., & Nahmias, C. (2003). Enhanced salience and emotion recognition in Autism: A PET study. *The American Journal of Psychiatry*, 160(8), 1439-1441. <https://doi.org/10.1176/appi.ajp.160.8.1439>
- Hall, K. R. L., & Earle, A. E. (1954). A Further Study of the Pendulum Phenomenon. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 6(3), 112-124. <https://doi.org/10.1080/17470215408416657>
- Hall, K. R. L., Earle, A. E., & Crookes, T. G. (1952). A Pendulum Phenomenon in the Visual Perception of Apparent Movement. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 4(3), 109-120. <https://doi.org/10.1080/17470215208416610>
- Hannah, R., & Aron, A. R. (2021). Towards real-world generalizability of a circuit for action-stopping. *Nature reviews. Neuroscience*, 22(9), 538-552. <https://doi.org/10.1038/s41583-021-00485-1>
- Harris, L. R., Blakemore, C., & Donaghy, M. (1980). Integration of visual and auditory space in the mammalian superior colliculus. *Nature*, 288, 56-59. <https://doi.org/10.1038/288056a0>
- HAS (2012). *Autisme et autres troubles envahissants du développement : interventions éducatives et thérapeutiques coordonnées chez l'enfant et l'adolescent*. Saint-Denis, La Plaine.
- HAS (2018). *Trouble du spectre de l'autisme : Signes d'alerte, repérage, diagnostic et évaluation chez l'enfant et l'adolescent*. Saint-Denis, La Plaine.
- Hasting, A. (2022). Syntax in a blink : Early and automatic processing of syntactic rules as revealed by event-related brain potentials. *MPI Series in Human Cognitive and Brain Sciences*, v.97 (2008).
- Hazen, E. P., Stornelli, J. L., O'Rourke, J. A., Koesterer, K., & McDougale, C. J. (2014). Sensory Symptoms in Autism Spectrum Disorders. *Harvard Review of Psychiatry*, 22(2), 112-124. <https://doi.org/10.1097/01.HRP.0000445143.08773.58>
- Heeringa, A. N., Wu, C., & Shore, S. E. (2018). Multisensory Integration Enhances Temporal Coding in Ventral Cochlear Nucleus Bushy Cells. *The Journal of Neuroscience*, 38(11), 2832-2843. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2244-17.2018>
- Heller Murray, E. S., Segawa, J., Karahanoglu, F. I., Tocci, C., Tourville, J. A., Nieto-Castanon, A., Tager-Flusberg, H., Manoach, D. S., & Guenther, F. H. (2022). Increased Intra-Subject Variability of Neural Activity During Speech Production in People with Autism Spectrum Disorder. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 94, 101955. <https://doi.org/10.1016/j.rasd.2022.101955>
- Hershenson, M. (1962). Reaction time as a measure of intersensory facilitation. *Journal of Experimental Psychology*, 63, 289-293. <https://doi.org/10.1037/h0039516>
- Hervault (2021). *Inhibition de l'action: un construit unitaire ? Investigation comportementale et électrophysiologique*. [Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier – Toulouse].
- Hilton, C., Graver, K., & LaVesser, P. (2007). Relationship between social competence and sensory processing in children with high functioning autism spectrum disorders. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 1(2), 164-173. <https://doi.org/10.1016/j.rasd.2006.10.002>
- Hirai, M., Gunji, A., Inoue, Y., Kita, Y., Hayashi, T., Nishimaki, K., Nakamura, M., Kakigi, R., & Inagaki, M. (2014). Differential electrophysiological responses to biological motion in children and adults with and without autism spectrum disorders. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 8(12), 1623-1634. <https://doi.org/10.1016/j.rasd.2014.08.014>
- Hlavacka, F., Mergner, T., & Krizkova, M. (1996). Control of the body vertical by vestibular and proprioceptive inputs. *Brain Research Bulletin*, 40(5-6), 431-434; discussion 434-435. [https://doi.org/10.1016/0361-9230\(96\)00138-4](https://doi.org/10.1016/0361-9230(96)00138-4)
- Hlavačka, F., Mergner, T., & Schweigart, G. (1992). Interaction of vestibular and proprioceptive inputs for human self-motion perception. *Neuroscience Letters*, 138(1), 161-164. [https://doi.org/10.1016/0304-3940\(92\)90496-T](https://doi.org/10.1016/0304-3940(92)90496-T)

- Hobson, R. P. (1986). THE AUTISTIC CHILD'S APPRAISAL OF EXPRESSIONS OF EMOTION. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 27(3), 321-342. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1986.tb01836.x>
- Hobson, R. P., Ouston, J., & Lee, A. (1988). Emotion recognition in autism : Coordinating faces and voices. *Psychological Medicine*, 18, 911-923. <https://doi.org/10.1017/S0033291700009843>
- Hoffman, M. F., Quittner, A. L., & Cejas, I. (2015). Comparisons of social competence in young children with and without hearing loss : A dynamic systems framework. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 20(2), 115-124. <https://doi.org/10.1093/deafed/enu040>
- Holmes, N. P., & Spence, C. (2005). Multisensory Integration : Space, Time and Superadditivity. *Current Biology*, 15(18), R762-R764. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2005.08.058>
- Hötting, K., & Röder, B. (2009). Auditory and auditory-tactile processing in congenitally blind humans. *Hearing Research*, 258(1-2), 165-174. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2009.07.012>
- Høyland, A. L., Øgrim, G., Lydersen, S., Hope, S., Engstrøm, M., Torske, T., Nærland, T., & Andreassen, O. A. (2017). Event-Related Potentials in a Cued Go-NoGo Task Associated with Executive Functions in Adolescents with Autism Spectrum Disorder; A Case-Control Study. *Frontiers in Neuroscience*, 11, 393. <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00393>
- Hu, Y., Chen, Z., Huang, L., Xi, Y., Li, B., Wang, H., Yan, J., Lee, T. M. C., Tao, Q., So, K.-F., & Ren, C. (2017). A translational study on looming-evoked defensive response and the underlying subcortical pathway in autism. *Scientific Reports*, 7(1), 14755. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15349-x>
- Hughes, H. C., Reuter-Lorenz, P. A., Nozawa, G., & Fendrich, R. (1994). Visual-auditory interactions in sensorimotor processing : Saccades versus manual responses. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 20(1), 131-153. <https://doi.org/10.1037//0096-1523.20.1.131>
- Hunley, S. B., & Lourenco, S. F. (2018). What is peripersonal space? An examination of unresolved empirical issues and emerging findings. *Wiley Interdisciplinary Reviews. Cognitive Science*, 9(6), e1472. <https://doi.org/10.1002/wcs.1472>
- Iarocci, G., & McDonald, J. (2006). Sensory Integration and the Perceptual Experience of Persons with Autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 36(1), 77-90. <https://doi.org/10.1007/s10803-005-0044-3>
- Iarocci, G., Rombough, A., Yager, J., Weeks, D. J., & Chua, R. (2010). Visual influences on speech perception in children with autism. *Autism*, 14, 305-320. <https://doi.org/10.1177/1362361309353615>
- Irwin, J. R., Tornatore, L. A., Brancazio, L., & Whalen, D. H. (2011). Can children with autism spectrum disorders « hear » a speaking face? *Child Development*, 82(5), 1397-1403. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2011.01619.x>
- Johansson, G. (1973). Visual perception of biological motion and a model for its analysis. *Perception & Psychophysics*, 14(2), 201-211. <https://doi.org/10.3758/BF03212378>
- Jones, W., & Klin, A. (2013). Attention to eyes is present but in decline in 2-6-month-old infants later diagnosed with autism. *Nature*, 504(7480), 427-431. <https://doi.org/10.1038/nature12715>
- Juan, C., Cappe, C., Alric, B., Roby, B., Gilardeau, S., Barone, P., & Girard, P. (2017). The variability of multisensory processes of natural stimuli in human and non-human primates in a detection task. *PLOS ONE*, 12(2), e0172480. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172480>
- Jumah, F., Ghannam, M., Jaber, M., Adeeb, N., & Tubbs, R. S. (2016). Neuroanatomical variation in autism spectrum disorder : A comprehensive review: Neuroanatomical Variation in Autism Spectrum Disorder. *Clinical Anatomy*, 29(4), 454-465. <https://doi.org/10.1002/ca.22717>
- Just, M. A. (2004). Cortical activation and synchronization during sentence comprehension in high-functioning autism : Evidence of underconnectivity. *Brain*, 127(8), 1811-1821. <https://doi.org/10.1093/brain/awh199>
- Kanner, L. (1943). Autistic disturbances of affective contact. 2, 217-250.
- Kayser, C., Petkov, C. I., Augath, M., & Logothetis, N. K. (2005). Integration of touch and sound in auditory cortex. *Neuron*, 48(2), 373-384. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2005.09.018>
- Keane, B. P., Rosenthal, O., Chun, N. H., & Shams, L. (2010). Audiovisual integration in high functioning adults with autism. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 4(2), 276-289. <https://doi.org/10.1016/j.rasd.2009.09.015>

- Keele, S. W., & Posner, M. I. (1968). Processing of visual feedback in rapid movements. *Journal of Experimental Psychology*, 77(1), 155-158. <https://doi.org/10.1037/h0025754>
- Kennedy, A., Bhattacharjee, A., Hansen, S., Reid, C., & Tremblay, L. (2015). Online Vision as a Function of Real-Time Limb Velocity : Another Case for Optimal Windows. *Journal of Motor Behavior*, 47(6), 465-475. <https://doi.org/10.1080/00222895.2015.1012579>
- Kern, J. K., Trivedi, M. H., Garver, C. R., Grannemann, B. D., Andrews, A. A., Savla, J. S., Johnson, D. G., Mehta, J. A., & Schroeder, J. L. (2006). The pattern of sensory processing abnormalities in autism. *Autism*, 10(5), 480-494. <https://doi.org/10.1177/1362361306066564>
- Khalifa, S., Bruneau, N., Rogé, B., Georgieff, N., Veuillet, E., Adrien, J.-L., Barthélémy, C., & Collet, L. (2004). Increased perception of loudness in autism. *Hearing Research*, 198(1-2), 87-92. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2004.07.006>
- Khan, M. A., Elliott, D., Coull, J., Chua, R., & Lyons, J. (2002). Optimal control strategies under different feedback strategies : Kinematic evidence. *Journal of Motor Behavior*, 34, 45-57. <https://doi.org/10.1080/00222890209601930>
- Khan, M. A., Franks, I. M., Elliott, D., Lawrence, G. P., Chua, R., Bernier, P.-M., Hansen, S., & Weeks, D. J. (2006). Inferring online and offline processing of visual feedback in target-directed movements from kinematic data. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 30(8), 1106-1121. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2006.05.002>
- Khanna, R. K., Kovarski, K., Arsene, S., Siwiaszczyk, M., Pisella, P.-J., Bonnet-Brilhault, F., Batty, M., & Malvy, J. (2020). Ophthalmological findings in children with autism spectrum disorder. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology = Albrecht Von Graefes Archiv Fur Klinische Und Experimentelle Ophthalmologie*, 258(4), 909-916. <https://doi.org/10.1007/s00417-019-04594-7>
- Kim, S. H., Macari, S., Koller, J., & Chawarska, K. (2016). Examining the phenotypic heterogeneity of early autism spectrum disorder : Subtypes and short-term outcomes. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 57(1), 93-102. <https://doi.org/10.1111/jcpp.12448>
- Kitagawa, N., & Ichihara, S. (2002). Hearing visual motion in depth. *Nature*, 416, 172-174. <https://doi.org/10.1038/416172a>
- Klasen, M., Chen, Y.-H., & Mathiak, K. (2012). Multisensory emotions : Perception, combination and underlying neural processes. *Reviews in the Neurosciences*, 23(4), 381-392. <https://doi.org/10.1515/revneuro-2012-0040>
- Klin, A., Jones, W., Schultz, R., Volkmar, F., & Cohen, D. (2002). Visual fixation patterns during viewing of naturalistic social situations as predictors of social competence in individuals with autism. *Archives of General Psychiatry*, 59(9), 809-816. <https://doi.org/10.1001/archpsyc.59.9.809>
- Kojovic, Ben Hadid, Franchini, & Schaer. (2019). Sensory Processing Issues and Their Association with Social Difficulties in Children with Autism Spectrum Disorders. *Journal of Clinical Medicine*, 8(10), 1508. <https://doi.org/10.3390/jcm8101508>
- Kondo, H. M., & Lin, I.-F. (2020). Excitation-inhibition balance and auditory multistable perception are correlated with autistic traits and schizotypy in a non-clinical population. *Scientific Reports*, 10(1), 8171. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65126-6>
- Kovarski, K., Malvy, J., Khanna, R. K., Arsène, S., Batty, M., & Latinus, M. (2019). Reduced visual evoked potential amplitude in autism spectrum disorder, a variability effect? *Translational Psychiatry*, 9(1), 341. <https://doi.org/10.1038/s41398-019-0672-6>
- Kovarski, K., Thillay, A., Houy-Durand, E., Roux, S., Bidet-Caulet, A., Bonnet-Brilhault, F., & Batty, M. (2016). Brief Report : Early VEPs to Pattern-Reversal in Adolescents and Adults with Autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 46(10), 3377-3386. <https://doi.org/10.1007/s10803-016-2880-8>
- Kovarski, K. (2018). From eyes to brain : A cross-disciplinary approach of visual functioning in Autism Spectrum Disorder. [Thèse de doctorat, Université François-Rabelais – Tours].
- Kröger, A., Bletsch, A., Krick, C., Siniatchkin, M., Jarczok, T. A., Freitag, C. M., & Bender, S. (2014). Visual event-related potentials to biological motion stimuli in autism spectrum disorders. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 9(8), 1214-1222. <https://doi.org/10.1093/scan/nst103>

- Kwakye, L. D., Foss-Feig, J. H., Cascio, C. J., Stone, W. L., & Wallace, M. T. (2011). Altered Auditory and Multisensory Temporal Processing in Autism Spectrum Disorders. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 4. <https://doi.org/10.3389/fnint.2010.00129>
- Lai, M.-C., Lombardo, M. V., & Baron-Cohen, S. (2014). Autism. *Lancet (London, England)*, 383(9920), 896-910. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(13\)61539-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(13)61539-1)
- Lainé, F., Rauzy, S., Gepner, B., & Tardif, C. (2009). Prise en compte des difficultés de traitement des informations visuelles et auditives rapides dans le cadre de l'évaluation diagnostique de l'autisme. *Enfance*, 2009(01), 133. <https://doi.org/10.4074/S0013754509001153>
- Lainé, F., Tardif, C., & Gepner, B. (2008). Amélioration de la reconnaissance et de l'imitation d'expressions faciales chez des enfants autistes grâce à une présentation visuelle et sonore ralentie. *Annales Médico-psychologiques, revue psychiatrique*, 166(7), 533-538. <https://doi.org/10.1016/j.amp.2005.09.032>
- Lakatos, S. (1995). The influence of visual cues on the localisation of circular auditory motion. *Perception*, 24(4), 457-465. <https://doi.org/10.1068/p240457>
- Lane, A. E., Young, R. L., Baker, A. E. Z., & Angley, M. T. (2010). Sensory Processing Subtypes in Autism : Association with Adaptive Behavior. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 40(1), 112-122. <https://doi.org/10.1007/s10803-009-0840-2>
- Latinus, M., Mofid, Y., Kovarski, K., Charpentier, J., Batty, M., & Bonnet-Brilhault, F. (2019). Atypical Sound Perception in ASD Explained by Inter-Trial (In)consistency in EEG. *Frontiers in Psychology*, 10. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2019.01177>
- Laugen, N. J., Jacobsen, K. H., Rieffe, C., & Wichstrøm, L. (2017). Social skills in preschool children with unilateral and mild bilateral hearing loss. *Deafness & Education International*, 19(2), 54-62. <https://doi.org/10.1080/14643154.2017.1344366>
- Laurienti, P. J., Kraft, R. A., Maldjian, J. A., Burdette, J. H., & Wallace, M. T. (2004). Semantic congruence is a critical factor in multisensory behavioral performance. *Experimental Brain Research*, 158(4), 405-414. <https://doi.org/10.1007/s00221-004-1913-2>
- LeDoux, J. E. (2000). Emotion circuits in the brain. *Annual Review of Neuroscience*, 23, 155-184. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.23.1.155>
- Leekam, S. R., Nieto, C., Libby, S. J., Wing, L., & Gould, J. (2007). Describing the sensory abnormalities of children and adults with autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 37(5), 894-910. <https://doi.org/10.1007/s10803-006-0218-7>
- Lehmann, D., & Skrandies, W. (1980). Reference-free identification of components of checkerboard-evoked multichannel potential fields. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 48(6), 609-621. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(80\)90419-8](https://doi.org/10.1016/0013-4694(80)90419-8)
- Lenroot, R. K., & Yeung, P. K. (2013). Heterogeneity within Autism Spectrum Disorders : What have We Learned from Neuroimaging Studies? *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 733. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00733>
- Lewis, J. W. (2000). A Comparison of Visual and Auditory Motion Processing in Human Cerebral Cortex. *Cerebral Cortex*, 10(9), 873-888. <https://doi.org/10.1093/cercor/10.9.873>
- Lewkowicz, D. J. (1986). Developmental changes in infants' bisensory response to synchronous durations. *Infant Behavior and Development*, 9(3), 335-353. [https://doi.org/10.1016/0163-6383\(86\)90008-1](https://doi.org/10.1016/0163-6383(86)90008-1)
- Lewkowicz, D. J. (1992). Infants' responsiveness to the auditory and visual attributes of a sounding/moving stimulus. *Perception & Psychophysics*, 52(5), 519-528. <https://doi.org/10.3758/bf03206713>
- Lewkowicz, D. J. (2008). Perception of Dynamic and Static Audiovisual Sequences in 3- and 4-Month-Old Infants. *Child Development*, 79(5), 1538-1554. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2008.01204.x>
- Lewkowicz, D. J. (2012). Development of Multisensory Temporal Perception. In M. M. Murray & M. T. Wallace (Éds.), *The Neural Bases of Multisensory Processes*. CRC Press/Taylor & Francis. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK92854/>
- Lewkowicz, D. J., & Turkewitz, G. (1981). Intersensory interaction in newborns : Modification of visual preferences following exposure to sound. *Child Development*, 52(3), 827-832.
- Leyfer, O. T., Folstein, S. E., Bacalman, S., Davis, N. O., Dinh, E., Morgan, J., Tager-Flusberg, H., & Lainhart, J. E. (2006). Comorbid psychiatric disorders in children with autism : Interview

- development and rates of disorders. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 36(7), 849-861. <https://doi.org/10.1007/s10803-006-0123-0>
- Lindell, A. K., Notice, K., & Withers, K. (2009). Reduced language processing asymmetry in non-autistic individuals with high levels of autism traits. *Laterality*, 14(5), 457-472. <https://doi.org/10.1080/13576500802507752>
- Liss, M., Saulnier, C., Fein, D., & Kinsbourne, M. (2006). Sensory and attention abnormalities in autistic spectrum disorders. *Autism: The International Journal of Research and Practice*, 10(2), 155-172. <https://doi.org/10.1177/1362361306062021>
- London, E. B. (2014). Categorical diagnosis : A fatal flaw for autism research? *Trends in Neurosciences*, 37(12), 683-686. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2014.10.003>
- Lovelace, C. T., Stein, B. E., & Wallace, M. T. (2003). An irrelevant light enhances auditory detection in humans : A psychophysical analysis of multisensory integration in stimulus detection. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, 17(2), 447-453. [https://doi.org/10.1016/s0926-6410\(03\)00160-5](https://doi.org/10.1016/s0926-6410(03)00160-5)
- Loveland, K. A., Steinberg, J. L., Pearson, D. A., Mansour, R., & Reddoch, S. (2008). Judgments of auditory-visual affective congruence in adolescents with and without autism : A pilot study of a new task using fMRI. *Perceptual and Motor Skills*, 107(2), 557-575. <https://doi.org/10.2466/pms.107.2.557-575>
- Loveland, K. A., Tunali-Kotoski, B., Chen, R., Brelsford, K. A., Ortegon, J., & Pearson, D. A. (1995). Intermodal perception of affect in persons with autism or Down syndrome. *Development and Psychopathology*, 7(3), 409-418. <https://doi.org/10.1017/S095457940000660X>
- Lucci, K. D. (2018). Purkinje cells and autism spectrum disorder. Is there an aetiological connection? *Neuropsychiatria i Neuropsychologia*, 13(2), 57-64. <https://doi.org/10.5114/nan.2018.79607>
- Maass, H. (1938). Über den Einfluss akustischer Rhythmen auf optische Bewegungsgestaltungen [About the influence of acoustic rhythms on visual motion]. (Sander, F. Ganzheit und Gestalt. Psychol. Untersuch. VIII). *Archiv für die Gesamte Psychologie*, 100, 424-464.
- Maier, J. X., Neuhoff, J. G., Logothetis, N. K., & Ghazanfar, A. A. (2004). Multisensory Integration of Looming Signals by Rhesus Monkeys. *Neuron*, 43(2), 177-181. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2004.06.027>
- Manabe, K., & Riquimaroux, H. (2000). Sound controls velocity perception of visual apparent motion. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, 21(3), 171-174. <https://doi.org/10.1250/ast.21.171>
- Mantzouranis, G., Baudat, S., & Zimmermann, G. (2019). Assessing Online and Offline Adolescent Social Skills : Development and Validation of the Real and Electronic Communication Skills Questionnaire. *Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*, 22(6), 404-411. <https://doi.org/10.1089/cyber.2018.0655>
- Marco, E. J., Hinkley, L. B. N., Hill, S. S., & Nagarajan, S. S. (2011). Sensory Processing in Autism : A Review of Neurophysiologic Findings: *Pediatric Research*, 69(5 Part 2), 48R-54R. <https://doi.org/10.1203/PDR.0b013e3182130c54>
- Marschark, M., Edwards, L., Peterson, C., Crowe, K., & Walton, D. (2019). Understanding Theory of Mind in Deaf and Hearing College Students. *The Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 24(2), 104-118. <https://doi.org/10.1093/deafed/eny039>
- Martuzzi, R., Murray, M. M., Michel, C. M., Thiran, J.-P., Maeder, P. P., Clarke, S., & Meuli, R. A. (2007). Multisensory interactions within human primary cortices revealed by BOLD dynamics. *Cerebral Cortex (New York, N.Y. : 1991)*, 17(7), 1672-1679. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhl077>
- Mateeff, S., Hohnsbein, J., & Noack, T. (1985). Dynamic visual capture : Apparent auditory motion induced by a moving visual target. *Perception*, 14(6), 721-727. <https://doi.org/10.1068/p140721>
- Matsushima, K., & Kato, T. (2013). Social Interaction and Atypical Sensory Processing in Children with Autism Spectrum Disorders *. *Hong Kong Journal of Occupational Therapy*, 23(2), 89-96. <https://doi.org/10.1016/j.hkjot.2013.11.003>
- Mayer, J. L. (2017). The Relationship Between Autistic Traits and Atypical Sensory Functioning in Neurotypical and ASD Adults : A Spectrum Approach. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 47(2), 316-327. <https://doi.org/10.1007/s10803-016-2948-5>

- McCary, L. M., & Roberts, J. E. (2013). Early identification of autism in fragile X syndrome : A review. *Journal of Intellectual Disability Research: JIDR*, 57(9), 803-814. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2788.2012.01609.x>
- Mcgurk, H., & Macdonald, J. (1976). Hearing lips and seeing voices. *Nature*, 264(5588), Article 5588. <https://doi.org/10.1038/264746a0>
- Meehl, P. E. (1990). Toward an integrated theory of schizotaxia, schizotypy, and schizophrenia. *Journal of Personality Disorders*, 4, 1-99. <https://doi.org/10.1521/pedi.1990.4.1.1>
- Meinzen-Derr, J., Wiley, S., Bishop, S., Manning-Courtney, P., Choo, D. I., & Murray, D. (2014). Autism spectrum disorders in 24 children who are deaf or hard of hearing. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 78(1), 112-118. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2013.10.065>
- Meiss, E., Tardif, C., Arciszewski, T., Dauvier, B., & Gepner, B. (2015). Effets positifs d'une exposition à des séquences vidéo ralenties sur l'attention, la communication sociale et les troubles du comportement chez 4 enfants autistes sévères : Une étude translationnelle pilote. *Neuropsychiatrie de l'Enfance et de l'Adolescence*, 63(5), 302-309. <https://doi.org/10.1016/j.neurenf.2015.01.004>
- Meredith, M. A. (2002). On the neuronal basis for multisensory convergence : A brief overview. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, 14(1), 31-40. [https://doi.org/10.1016/s0926-6410\(02\)00059-9](https://doi.org/10.1016/s0926-6410(02)00059-9)
- Meredith, M. A., Nemitz, J. W., & Stein, B. E. (1987). Determinants of multisensory integration in superior colliculus neurons. I. Temporal factors. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 7(10), 3215-3229.
- Mestre, D., Rondan, C., Masson, G., Castet, E., Deruelle, C., & Gepner, B. (2002). Evaluation de la vision du mouvement chez des enfants autistes au moyen du nystagmus opto-cinétique. 21, 192-198.
- Mesulam, M. M., & Mufson, E. J. (1982). Insula of the old world monkey. III : Efferent cortical output and comments on function. *The Journal of Comparative Neurology*, 212(1), 38-52. <https://doi.org/10.1002/cne.902120104>
- Miller, J. (1982). Divided attention : Evidence for coactivation with redundant signals. *Cognitive Psychology*, 14(2), 247-279. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(82\)90010-X](https://doi.org/10.1016/0010-0285(82)90010-X)
- Miller, J. (1991). Channel interaction and the redundant-targets effect in bimodal divided attention. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 17(1), 160-169. <https://doi.org/10.1037//0096-1523.17.1.160>
- Milne, E., Swettenham, J., Hansen, P., Campbell, R., Jeffries, H., & Plaisted, K. (2002). High motion coherence thresholds in children with autism. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 43(2), 255-263. <https://doi.org/10.1111/1469-7610.00018>
- Milne, E., White, S., Campbell, R., Swettenham, J., Hansen, P., & Ramus, F. (2006). Motion and Form Coherence Detection in Autistic Spectrum Disorder : Relationship to Motor Control and 2:4 Digit Ratio. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 36(2), 225-237. <https://doi.org/10.1007/s10803-005-0052-3>
- Minshew, N. J., & Williams, D. L. (2007). The new neurobiology of autism : Cortex, connectivity, and neuronal organization. *Archives of Neurology*, 64(7), 945-950. <https://doi.org/10.1001/archneur.64.7.945>
- Minter, M. E., Hobson, R. P., & Pring, L. (1991). Recognition of vocally expressed emotion by congenitally blind children. *Journal of Visual Impairment & Blindness*, 85, 411-415.
- Molholm, S., Murphy, J. W., Bates, J., Ridgway, E. M., & Foxe, J. J. (2020). Multisensory Audiovisual Processing in Children With a Sensory Processing Disorder (I): Behavioral and Electrophysiological Indices Under Speeded Response Conditions. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 14, 4. <https://doi.org/10.3389/fnint.2020.00004>
- Molholm, S., Ritter, W., Murray, M. M., Javitt, D. C., Schroeder, C. E., & Foxe, J. J. (2002). Multisensory auditory-visual interactions during early sensory processing in humans : A high-density electrical mapping study. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, 14(1), 115-128. [https://doi.org/10.1016/s0926-6410\(02\)00066-6](https://doi.org/10.1016/s0926-6410(02)00066-6)
- Mongillo, E. A., Irwin, J. R., Whalen, D. H., Klaiman, C., Carter, A. S., & Schultz, R. T. (2008). Audiovisual Processing in Children with and without Autism Spectrum Disorders. *Journal of*

- Autism and Developmental Disorders, 38(7), 1349-1358. <https://doi.org/10.1007/s10803-007-0521-y>
- Morrell, F. (1972). Visual System's View of Acoustic Space. *Nature*, 238(5358), 44-46. <https://doi.org/10.1038/238044a0>
- Morrongiello, B. A., & Fenwick, K. D. (1991). Infants' coordination of auditory and visual depth information. *Journal of Experimental Child Psychology*, 52(3), 277-296. [https://doi.org/10.1016/0022-0965\(91\)90064-Y](https://doi.org/10.1016/0022-0965(91)90064-Y)
- Mosconi, M. W., Cody-Hazlett, H., Poe, M. D., Gerig, G., Gimpel-Smith, R., & Piven, J. (2009). Longitudinal study of amygdala volume and joint attention in 2- to 4-year-old children with autism. *Archives of General Psychiatry*, 66(5), 509-516. <https://doi.org/10.1001/archgenpsychiatry.2009.19>
- Mottron, L., Dawson, M., Soulières, 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. <https://doi.org/10.1007/s10803-005-0040-7>
- Mottron, L., Mineau, S., Martel, G., Bernier, C. S.-C., Berthiaume, C., Dawson, M., Lemay, M., Palardy, S., Charman, T., & Faubert, J. (2007). Lateral glances toward moving stimuli among young children with autism: Early regulation of locally oriented perception? *Development and Psychopathology*, 19(1), 23-36. <https://doi.org/10.1017/S0954579407070022>
- Mufson, E. J., & Mesulam, M. M. (1984). Thalamic connections of the insula in the rhesus monkey and comments on the paralimbic connectivity of the medial pulvinar nucleus. *The Journal of Comparative Neurology*, 227(1), 109-120. <https://doi.org/10.1002/cne.902270112>
- Munson, J., Dawson, G., Abbott, R., Faja, S., Webb, S. J., Friedman, S. D., Shaw, D., Artru, A., & Dager, S. R. (2006). Amygdalar volume and behavioral development in autism. *Archives of General Psychiatry*, 63(6), 686-693. <https://doi.org/10.1001/archpsyc.63.6.686>
- Murray, M. M., Brunet, D., & Michel, C. M. (2008). Topographic ERP Analyses: A Step-by-Step Tutorial Review. *Brain Topography*, 20(4), 249-264. <https://doi.org/10.1007/s10548-008-0054-5>
- Nees, F., Banaschewski, T., Bokde, A. L. W., Desrivières, S., Grigis, A., Garavan, H., Gowland, P., Grimmer, Y., Heinz, A., Brühl, R., Isensee, C., Becker, A., Martinot, J.-L., Paillère Martinot, M.-L., Artiges, E., Papadopoulos Orfanos, D., Lemaître, H., Stringaris, A., van Noort, B., ... On Behalf Of The Imagen Consortium, null. (2022). Global and Regional Structural Differences and Prediction of Autistic Traits during Adolescence. *Brain Sciences*, 12(9), 1187. <https://doi.org/10.3390/brainsci12091187>
- Newman, R. S., Kirby, L. A., Von Holzen, K., & Redcay, E. (2021). Read my lips ! Perception of speech in noise by preschool children with autism and the impact of watching the speaker's face. *Journal of Neurodevelopmental Disorders*, 13(1), 4. <https://doi.org/10.1186/s11689-020-09348-9>
- Noel, J.-P., Failla, M. D., Quinde-Zlibut, J. M., Williams, Z. J., Gerdes, M., Tracy, J. M., Zoltowski, A. R., Foss-Feig, J. H., Nichols, H., Armstrong, K., Heckers, S. H., Blake, R. R., Wallace, M. T., Park, S., & Cascio, C. J. (2020). Visual-Tactile Spatial Multisensory Interaction in Adults With Autism and Schizophrenia. *Frontiers in Psychiatry*, 11. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsy.2020.578401>
- Noel, J.-P., Stevenson, R. A., & Wallace, M. T. (2018). Atypical audiovisual temporal function in autism and schizophrenia: Similar phenotype, different cause. *European Journal of Neuroscience*, 47(10), 1230-1241. <https://doi.org/10.1111/ejn.13911>
- O'Connor, K. (2007). Brief report: Impaired identification of discrepancies between expressive faces and voices in adults with Asperger's syndrome. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 37(10), 2008-2013. <https://doi.org/10.1007/s10803-006-0345-1>
- O'Connor, K. (2012). Auditory processing in autism spectrum disorder: A review. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 36(2), 836-854. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.11.008>
- Ohmura, H. (1987). Intersensory influences on the perception of apparent movement. *Japanese Psychological Research*, 29, 1-9.

- Orekhova, E. V., Stroganova, T. A., Nygren, G., Tsetlin, M. M., Posikera, I. N., Gillberg, C., & Elam, M. (2007). Excess of high frequency electroencephalogram oscillations in boys with autism. *Biological Psychiatry*, 62(9), 1022-1029. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2006.12.029>
- Orekhova, E. V., Stroganova, T. A., Prokofiev, A. O., Nygren, G., Gillberg, C., & Elam, M. (2009). The right hemisphere fails to respond to temporal novelty in autism : Evidence from an ERP study. *Clinical Neurophysiology: Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 120(3), 520-529. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2008.12.034>
- Orioli, G., Bremner, A. J., & Farroni, T. (2018). Multisensory perception of looming and receding objects in human newborns. *Current Biology*, 28(22), R1294-R1295. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.10.004>
- Ornitz, E. M. (1974). The modulation of sensory input and motor output in autistic children. *Journal of Autism and Childhood Schizophrenia*, 4(3), 197-215. <https://doi.org/10.1007/BF02115226>
- Ostrolenk, A., Bao, V. A., Mottron, L., Collignon, O., & Bertone, A. (2019). Reduced multisensory facilitation in adolescents and adults on the Autism Spectrum. *Scientific Reports*, 9(1), 11965. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48413-9>
- Parker, A., & Alais, D. (2007). A bias for looming stimuli to predominate in binocular rivalry. *Vision Research*, 47(20), 2661-2674. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2007.06.019>
- Parker, A. L., & Alais, D. M. (2010). Auditory modulation of binocular rivalry. *Journal of Vision*, 6(6), 855-855. <https://doi.org/10.1167/6.6.855>
- Parsons, S., Mitchell, P., & Leonard, A. (2004). The use and understanding of virtual environments by adolescents with autistic spectrum disorders. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 34(4), 449-466. <https://doi.org/10.1023/b:jadd.0000037421.98517.8d>
- Patterson, M. L., & Werker, J. F. (2002). Infants' ability to match dynamic phonetic and gender information in the face and voice. *Journal of Experimental Child Psychology*, 81(1), 93-115. <https://doi.org/10.1006/jecp.2001.2644>
- Patterson, M. L., & Werker, J. F. (2003). Two-month-old infants match phonetic information in lips and voice. *Developmental Science*, 6(2), 191-196. <https://doi.org/10.1111/1467-7687.00271>
- Pearson, R. C., Brodal, P., Gatter, K. C., & Powell, T. P. (1982). The organization of the connections between the cortex and the claustrum in the monkey. *Brain Research*, 234(2), 435-441. [https://doi.org/10.1016/0006-8993\(82\)90883-6](https://doi.org/10.1016/0006-8993(82)90883-6)
- Peiper, A. (1963). *Cerebral function in infancy and childhood*. Consultants Bureau.
- Pellicano, E., Gibson, L., Maybery, M., Durkin, K., & Badcock, D. R. (2005). Abnormal global processing along the dorsal visual pathway in autism : A possible mechanism for weak visuospatial coherence? *Neuropsychologia*, 43(7), 1044-1053. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2004.10.003>
- Peterson, C. C., Peterson, J. L., & Webb, J. (2000). Factors influencing the development of a theory of mind in blind children. *British Journal of Developmental Psychology*, 18(3), 431-447. <https://doi.org/10.1348/026151000165788>
- Peterson, C. C., & Siegal, M. (1995). Deafness, Conversation and Theory of Mind. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 36(3), 459-474. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1995.tb01303.x>
- Peterson, C. C., & Siegal, M. (1999). Representing Inner Worlds : Theory of Mind in Autistic, Deaf, and Normal Hearing Children. *Psychological Science*, 10(2), 126-129. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00119>
- Pickens, J. N. (1990). Perception of bimodal distance relations by 5-month-old human infants—ProQuest. <https://www.proquest.com/openview/c2844e4ab183328bbbedd8a09c8f1c9e7/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
- Piven, J., Palmer, P., Jacobi, D., Childress, D., & Arndt, S. (1997). Broader autism phenotype : Evidence from a family history study of multiple-incidence autism families. *The American Journal of Psychiatry*, 154(2), 185-190. <https://doi.org/10.1176/ajp.154.2.185>
- Pons, F., Lewkowicz, D. J., Soto-Faraco, S., & Sebastián-Gallés, N. (2009). Narrowing of intersensory speech perception in infancy. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(26), 10598-10602. <https://doi.org/10.1073/pnas.0904134106>
- Posar, A., & Visconti, P. (2018). Sensory abnormalities in children with autism spectrum disorder. *Jornal de Pediatria*, 94(4), 342-350. <https://doi.org/10.1016/j.jped.2017.08.008>

- Powers, A. R., Hillock, A. R., & Wallace, M. T. (2009). Perceptual Training Narrows the Temporal Window of Multisensory Binding. *The Journal of Neuroscience*, 29(39), 12265-12274. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3501-09.2009>
- Preisler, G. M. (1991). Early patterns of interaction between blind infants and their sighted mothers. *Child: Care, Health and Development*, 17(2), 65-90. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2214.1991.tb00680.x>
- Proust, M. (1987). *Du côté de chez Swann* (Gallimard).
- Putzar, L., Goerendt, I., Lange, K., Rösler, F., & Röder, B. (2007). Early visual deprivation impairs multisensory interactions in humans. *Nature Neuroscience*, 10(10), 1243-1245. <https://doi.org/10.1038/nn1978>
- Raab, D. H. (1962). Statistical facilitation of simple reaction times. *Transactions of the New York Academy of Sciences*, 24, 574-590. <https://doi.org/10.1111/j.2164-0947.1962.tb01433.x>
- Reisberg, D., McLean, J., & Goldfield, A. (1987). Easy to hear but hard to understand : A lip-reading advantage with intact auditory stimuli. In *Hearing by eye : The psychology of lip-reading* (p. 97-113). Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Ring, H., Woodbury-Smith, M., Watson, P., Wheelwright, S., & Baron-Cohen, S. (2008). Clinical heterogeneity among people with high functioning autism spectrum conditions : Evidence favouring a continuous severity gradient. *Behavioral and Brain Functions*, 4(1), 11. <https://doi.org/10.1186/1744-9081-4-11>
- Rippon, G., Brock, J., Brown, C., & Boucher, J. (2007). Disordered connectivity in the autistic brain : Challenges for the « new psychophysiology ». *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, 63(2), 164-172. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2006.03.012>
- Ritvo, R. A., Ritvo, E. R., Guthrie, D., Ritvo, M. J., Hufnagel, D. H., McMahon, W., Tonge, B., Mataix-Cols, D., Jassi, A., Attwood, T., & Eloff, J. (2011). The Ritvo Autism Asperger Diagnostic Scale-Revised (RAADS-R) : A Scale to Assist the Diagnosis of Autism Spectrum Disorder in Adults: An International Validation Study. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 41(8), 1076-1089. <https://doi.org/10.1007/s10803-010-1133-5>
- Robertson, C. E., & Baron-Cohen, S. (2017a). Sensory perception in autism. *Nature Reviews Neuroscience*, 18(11), 671-684. <https://doi.org/10.1038/nrn.2017.112>
- Robertson, C. E., & Baron-Cohen, S. (2017b). Sensory perception in autism. *Nature Reviews Neuroscience*, 18(11), 671-684. <https://doi.org/10.1038/nrn.2017.112>
- Robertson, C. E., Martin, A., Baker, C. I., & Baron-Cohen, S. (2012). Atypical Integration of Motion Signals in Autism Spectrum Conditions. *PLoS ONE*, 7(11), e48173. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0048173>
- Roch-Levecq, A.-C. (2006). Production of basic emotions by children with congenital blindness : Evidence for the embodiment of theory of mind. *British Journal of Developmental Psychology*, 24, 507-528. <https://doi.org/10.1348/026151005X50663>
- Rockland, K. S., & Ojima, H. (2003). Multisensory convergence in calcarine visual areas in macaque monkey. *International Journal of Psychophysiology: Official Journal of the International Organization of Psychophysiology*, 50(1-2), 19-26. [https://doi.org/10.1016/s0167-8760\(03\)00121-1](https://doi.org/10.1016/s0167-8760(03)00121-1)
- Röder, B., Kusmierek, A., Spence, C., & Schicke, T. (2007). Developmental vision determines the reference frame for the multisensory control of action. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(11), 4753-4758. <https://doi.org/10.1073/pnas.0607158104>
- Röder, B., Rösler, F., & Spence, C. (2004). Early vision impairs tactile perception in the blind. *Current Biology*, 14(2), 121-124.
- Romei, V., Murray, M. M., Cappe, C., & Thut, G. (2009). Preperceptual and Stimulus-Selective Enhancement of Low-Level Human Visual Cortex Excitability by Sounds. *Current Biology*, 19(21), 1799-1805. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.09.027>
- Rose, S. A. (1981). Developmental changes in infants' retention of visual stimuli. *Child Development*, 52(1), 227-233.
- Rose, S. A., & Ruff, H. A. (1987). Cross-modal abilities in human infants. In *Handbook of infant development*, 2nd ed (p. 318-362). John Wiley & Sons.

- Rosenhall, U., Nordin, V., Sandström, M., Ahlsén, G., & Gillberg, C. (1999). Autism and hearing loss. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 29(5), 349-357. <https://doi.org/10.1023/a:1023022709710>
- Rossetti, Y., Stelmach, G., Desmurget, M., Prablanc, C., & Jeannerod, M. (1994). The effect of viewing the static hand prior to movement onset on pointing kinematics and variability. *Experimental Brain Research*, 101(2), 323-330. <https://doi.org/10.1007/BF00228753>
- Ruiz-Martínez, F. J., Rodríguez-Martínez, E. I., Wilson, C. E., Yau, S., Saldaña, D., & Gómez, C. M. (2020). Impaired P1 Habituation and Mismatch Negativity in Children with Autism Spectrum Disorder. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 50(2), 603-616. <https://doi.org/10.1007/s10803-019-04299-0>
- Russo, N., Foxe, J. J., Brandwein, A. B., Altschuler, T., Gomes, H., & Molholm, S. (2010). Multisensory processing in children with autism : High-density electrical mapping of auditory-somatosensory integration. *Autism Research*, 3(5), 253-267. <https://doi.org/10.1002/aur.152>
- Saalasti, S., Kätsyri, J., Tiippana, K., Laine-Hernandez, M., von Wendt, L., & Sams, M. (2012). Audiovisual speech perception and eye gaze behavior of adults with asperger syndrome. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 42(8), 1606-1615. <https://doi.org/10.1007/s10803-011-1400-0>
- Sasson, N. J., & Bottema-Beutel, K. (2022). Studies of autistic traits in the general population are not studies of autism. *Autism*, 26(4), 1007-1008. <https://doi.org/10.1177/13623613211058515>
- Sauvage, D. (1988). *Autisme du nourrisson et du jeune enfant* (Paris: Masson).
- Sauvage, D., Faure, M., Adrien, J.-L., Hameury, L., Barthélémy, C., & Pierrot, A. (1988). *Autisme et films familiaux* (Vol. 4). *Annales Psychiatriques*.
- Saygin, A. P., Driver, J., & de Sa, V. R. (2008). In the Footsteps of Biological Motion and Multisensory Perception : Judgments of Audiovisual Temporal Relations Are Enhanced for Upright Walkers. *Psychological Science*, 19(5), 469-475. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2008.02111.x>
- Sayorwan, W., Phianchana, N., Permpoonputtana, K., & Siripornpanich, V. (2018). A Study of the Correlation between VEP and Clinical Severity in Children with Autism Spectrum Disorder. *Autism Research and Treatment*, 2018, 5093016. <https://doi.org/10.1155/2018/5093016>
- Schiff, W. (1965). Perception of impending collision : A study of visually directed avoidant behavior. *Psychological Monographs: General and Applied*, 79, 1-26. <https://doi.org/10.1037/h0093887>
- Schiff, W., Caviness, J. A., & Gibson, J. J. (1962). Persistent Fear Responses in Rhesus Monkeys to the Optical Stimulus of « Looming ». *Science*, 136(3520), 982-983. <https://doi.org/10.1126/science.136.3520.982>
- Schroeder, C. E., & Foxe, J. J. (2002). The timing and laminar profile of converging inputs to multisensory areas of the macaque neocortex. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, 14(1), 187-198. [https://doi.org/10.1016/S0926-6410\(02\)00073-3](https://doi.org/10.1016/S0926-6410(02)00073-3)
- Schroeder, C. E., Lindsley, R. W., Specht, C., Marcovici, A., Smiley, J. F., & Javitt, D. C. (2001). Somatosensory input to auditory association cortex in the macaque monkey. *Journal of Neurophysiology*, 85(3), 1322-1327. <https://doi.org/10.1152/jn.2001.85.3.1322>
- Schröger, E., & Widmann, A. (1998). Speeded responses to audiovisual signal changes result from bimodal integration. *Psychophysiology*, 35(6), 755-759.
- Schumann, C. M., Hamstra, J., Goodlin-Jones, B. L., Lotspeich, L. J., Kwon, H., Buonocore, M. H., Lammers, C. R., Reiss, A. L., & Amaral, D. G. (2004). The amygdala is enlarged in children but not adolescents with autism; the hippocampus is enlarged at all ages. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 24(28), 6392-6401. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1297-04.2004>
- Shah, A., & Frith, U. (1983). An islet of ability in autistic children : A research note. *Child Psychology & Psychiatry & Allied Disciplines*, 24, 613-620. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1983.tb00137.x>
- Shams, L., Kamitani, Y., & Shimojo, S. (2002). Visual illusion induced by sound. *Cognitive Brain Research*, 14(1), 147-152. [https://doi.org/10.1016/S0926-6410\(02\)00069-1](https://doi.org/10.1016/S0926-6410(02)00069-1)
- Shaw, B. K., McGowan, R. S., & Turvey, M. T. (1991). An acoustic variable specifying time-to-contact. *Ecological Psychology*, 3, 253-261. https://doi.org/10.1207/s15326969eco0303_4
- Shelton, J., & Kumar, G. P. (2010). Comparison between Auditory and Visual Simple Reaction Times. *Neuroscience and Medicine*, 01(01), 30-32. <https://doi.org/10.4236/nm.2010.11004>

- Shibasaki, H. (2008). Human brain mapping: Hemodynamic response and electrophysiology. *Clinical Neurophysiology: Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 119(4), 731–743. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2007.10.026>
- Sica, G. T. (2006). Bias in research studies. *Radiology*, 238(3), 780-789. <https://doi.org/10.1148/radiol.2383041109>
- Simmons, D. R., Robertson, A. E., McKay, L. S., Toal, E., McAleer, P., & Pollick, F. E. (2009). Vision in autism spectrum disorders. *Vision Research*, 49(22), 2705-2739. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2009.08.005>
- Slutsky, D. A., & Recanzone, G. H. (2001). Temporal and spatial dependency of the ventriloquism effect. *NeuroReport: For Rapid Communication of Neuroscience Research*, 12, 7-10. <https://doi.org/10.1097/00001756-200101220-00009>
- Smith, E. G., & Bennetto, L. (2007). Audiovisual speech integration and lipreading in autism. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 48(8), 813-821. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2007.01766.x>
- Sokhadze, E., Baruth, J., Tasman, A., Sears, L., Mathai, G., El-Baz, A., & Casanova, M. F. (2009). Event-related potential study of novelty processing abnormalities in autism. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 34(1), 37-51. <https://doi.org/10.1007/s10484-009-9074-5>
- Sokhadze, E. M., Lamina, E. V., Casanova, E. L., Kelly, D. P., Opris, I., Khachidze, I., & Casanova, M. F. (2017). Atypical Processing of Novel Distracters in a Visual Oddball Task in Autism Spectrum Disorder. *Behavioral Sciences (Basel, Switzerland)*, 7(4), E79. <https://doi.org/10.3390/bs7040079>
- Soto-Faraco, S., Kingstone, A., & Spence, C. (2003). Multisensory contributions to the perception of motion. *Neuropsychologia*, 41(13), 1847-1862. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(03\)00185-4](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(03)00185-4)
- Spelke, E. S., Born, W. S., & Chu, F. (1983). Perception of Moving, Sounding Objects by Four-Month-Old Infants. *Perception*, 12(6), 719-732. <https://doi.org/10.1068/p120719>
- Spence, C., & Driver, J. (Éds.). (2004). *Crossmodal Space and Crossmodal Attention*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198524861.001.0001>
- Spence, C., & Squire, S. (2003). Multisensory integration : Maintaining the perception of synchrony. *Current Biology: CB*, 13(13), R519-521. [https://doi.org/10.1016/s0960-9822\(03\)00445-7](https://doi.org/10.1016/s0960-9822(03)00445-7)
- Spencer, J., O'Brien, J., Riggs, K., Braddick, O., Atkinson, J., & Wattam-Bell, J. (2000). Motion processing in autism : Evidence for a dorsal stream deficiency. *Neuroreport*, 11(12), 2765-2767. <https://doi.org/10.1097/00001756-200008210-00031>
- Spencer, J. V., & O'Brien, J. M. D. (2006). Visual form-processing deficits in autism. *Perception*, 35(8), 1047-1055. <https://doi.org/10.1068/p5328>
- Sperdin, H. F., Cappe, C., & Murray, M. M. (2010). The Behavioral Relevance of Multisensory Neural Response Interactions. *Frontiers in Neuroscience*, 4, 9. <https://doi.org/10.3389/neuro.01.009.2010>
- Spiker, D., Lotspeich, L. J., Dimiceli, S., Myers, R. M., & Risch, N. (2002). Behavioral phenotypic variation in autism multiplex families : Evidence for a continuous severity gradient. *American Journal of Medical Genetics*, 114(2), 129-136. <https://doi.org/10.1002/ajmg.10188>
- Staal, H. E., & Donderi, D. C. (1983). The Effect of Sound on Visual Apparent Movement. *The American Journal of Psychology*, 96(1), 95-105. <https://doi.org/10.2307/1422212>
- Stahl, L., Reymond, M., & Pry, R. (2003). Autisme et développement des fonctions attentionnelles. In *L'enfant dans le lien social* (p. 259-265). Érés. <https://doi.org/10.3917/eres.zaouc.2003.01.0259>
- Stefanou, M. E., Dundon, N. M., Bestelmeyer, P. E. G., Ioannou, C., Bender, S., Biscaldi, M., Smyrnis, N., & Klein, C. (2020). Late attentional processes potentially compensate for early perceptual multisensory integration deficits in children with autism : Evidence from evoked potentials. *Scientific Reports*, 10(1), 16157. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73022-2>
- Stein, B. E., & Meredith, M. A. (1993). *The merging of the senses*. The MIT Press.
- Stein, B. E., Meredith, M. A., Huneycutt, W. S., & McDade, L. (1989). Behavioral Indices of Multisensory Integration : Orientation to Visual Cues is Affected by Auditory Stimuli. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 1(1), 12-24. <https://doi.org/10.1162/jocn.1989.1.1.12>

- Stein, B. E., & Rowland, B. A. (2011). Organization and Plasticity in Multisensory Integration : Early and Late Experience Affects its Governing Principles. *Progress in brain research*, 191, 145-163. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53752-2.00007-2>
- Stein, B. E., & Stanford, T. R. (2008). Multisensory integration : Current issues from the perspective of the single neuron. *Nature Reviews. Neuroscience*, 9(4), 255-266. <https://doi.org/10.1038/nrn2331>
- Stein, B. E., Stanford, T. R., & Rowland, B. A. (2020). Multisensory Integration and the Society for Neuroscience: Then and Now. *The Journal of Neuroscience*, 40(1), 3-11. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0737-19.2019>
- Stekelenburg, J. J., & Vroomen, J. (2005). An event-related potential investigation of the time-course of temporal ventriloquism. *Neuroreport*, 16(6), 641-644. <https://doi.org/10.1097/00001756-200504250-00025>
- Stevenson, R. A., Baum, S. H., Segers, M., Ferber, S., Barense, M. D., & Wallace, M. T. (2017). Multisensory speech perception in autism spectrum disorder : From phoneme to whole-word perception. *Autism Research: Official Journal of the International Society for Autism Research*, 10(7), 1280-1290. <https://doi.org/10.1002/aur.1776>
- Stevenson, R. A., Sheffield, S. W., Butera, I. M., Gifford, R. H., & Wallace, M. T. (2017). Multisensory Integration in Cochlear Implant Recipients. *Ear and Hearing*, 38(5), 521-538. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000435>
- Stevenson, R. A., Siemann, J. K., Schneider, B. C., Eberly, H. E., Woynaroski, T. G., Camarata, S. M., & Wallace, M. T. (2014). Multisensory Temporal Integration in Autism Spectrum Disorders. *The Journal of Neuroscience*, 34(3), 691-697. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3615-13.2014>
- Stevenson, R. A., Siemann, J. K., Woynaroski, T. G., Schneider, B. C., Eberly, H. E., Camarata, S. M., & Wallace, M. T. (2014). Brief report : Arrested development of audiovisual speech perception in autism spectrum disorders. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 44(6), 1470-1477. <https://doi.org/10.1007/s10803-013-1992-7>
- Stevenson, R. A., Wilson, M. M., Powers, A. R., & Wallace, M. T. (2013). The effects of visual training on multisensory temporal processing. *Experimentelle Hirnforschung. Experimentation cerebrale*, 225(4), 479-489. <https://doi.org/10.1007/s00221-012-3387-y>
- Stewart, C. R., Sanchez, S. S., Grenesko, E. L., Brown, C. M., Chen, C. P., Keehn, B., Velasquez, F., Lincoln, A. J., & Müller, R.-A. (2016). Sensory Symptoms and Processing of Nonverbal Auditory and Visual Stimuli in Children with Autism Spectrum Disorder. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 46(5), 1590-1601. <https://doi.org/10.1007/s10803-015-2367-z>
- Stewart, G. R., Wallace, G. L., Cottam, M., & Charlton, R. A. (2020). Theory of mind performance in younger and older adults with elevated autistic traits. *Autism Research*, 13(5), 751-762. <https://doi.org/10.1002/aur.2206>
- Stewart, M. E., & Ota, M. (2008). Lexical effects on speech perception in individuals with “autistic” traits. *Cognition*, 109(1), 157-162. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2008.07.010>
- Stewart, M. E., Watson, J., Allcock, A.-J., & Yaqoob, T. (2009). Autistic traits predict performance on the block design. *Autism*, 13(2), 133-142. <https://doi.org/10.1177/1362361308098515>
- Sumbly, W. H., & Pollack, I. (1954). Visual contribution to speech intelligibility in noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 26, 212-215. <https://doi.org/10.1121/1.1907309>
- Summerfield, Q. (1987). Speech perception in normal and impaired hearing. *British Medical Bulletin*, 43(4), 909-925. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.bmb.a072225>
- Tager-Flusberg, H., & Caronna, E. (2007). Language disorders: Autism and other pervasive developmental disorders. *Pediatric Clinics of North America*, 54(3), 469-481, vi. <https://doi.org/10.1016/j.pcl.2007.02.011>
- Takayama, Y., Hashimoto, R., Tani, M., Kanai, C., Yamada, T., Watanabe, H., Ono, T., Kato, N., & Iwanami, A. (2014). Standardization of the Japanese version of the Glasgow Sensory Questionnaire (GSQ). *Research in Autism Spectrum Disorders*, 8(4), 347-353. <https://doi.org/10.1016/j.rasd.2013.12.017>
- Tamietto, M., & de Gelder, B. (2010). Neural bases of the non-conscious perception of emotional signals. *Nature Reviews. Neuroscience*, 11(10), 697-709. <https://doi.org/10.1038/nrn2889>

- Tan, Y.-H., Xi, C.-Y., Jiang, S.-P., Shi, B.-X., Wang, L.-B., & Wang, L. (2012). Auditory abnormalities in children with autism. *Open Journal of Psychiatry*, 02(01), 33-37. <https://doi.org/10.4236/ojpsych.2012.21005>
- Tanaka, J. W., & Sung, A. (2016). The « Eye Avoidance » Hypothesis of Autism Face Processing. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 46(5), 1538-1552. <https://doi.org/10.1007/s10803-013-1976-7>
- Tardif, C., Charrier, A., & Gepner, B. (2016). Ralentir les mouvements du visage pour mieux l'explorer : Une étude en oculométrie auprès d'enfants avec troubles du spectre de l'autisme. Approche neuropsychologique des apprentissages chez l'enfant. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01787253>
- Tardif, C., & Gepner, B. (2012). LogiralTM [Logiciel PC]. Téléchargeable sur <http://centrepysycleamu.fr/LogiralTM>.
- Tardif, C., Lainé, F., Rodriguez, M., & Gepner, B. (2007). Slowing Down Presentation of Facial Movements and Vocal Sounds Enhances Facial Expression Recognition and Induces Facial-Vocal Imitation in Children with Autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 37(8), 1469-1484. <https://doi.org/10.1007/s10803-006-0223-x>
- Tardif, C., Thomas, K., & Gepner, B. (2002). Contribution à l'évaluation du système phonologique explicite chez des enfants autistes. *Revue parole*, 21, 35-72.
- Tavassoli, T., Miller, L. J., Schoen, S. A., Nielsen, D. M., & Baron-Cohen, S. (2014). Sensory over-responsivity in adults with autism spectrum conditions. *Autism: The International Journal of Research and Practice*, 18(4), 428-432. <https://doi.org/10.1177/1362361313477246>
- Taylor, N., Isaac, C., & Milne, E. (2010). A comparison of the development of audiovisual integration in children with autism spectrum disorders and typically developing children. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 40(11), 1403-1411. <https://doi.org/10.1007/s10803-010-1000-4>
- Teder-Sälejärvi, W. A., McDonald, J. J., Di Russo, F., & Hillyard, S. A. (2002a). An analysis of audiovisual crossmodal integration by means of event-related potential (ERP) recordings. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, 14(1), 106-114. [https://doi.org/10.1016/s0926-6410\(02\)00065-4](https://doi.org/10.1016/s0926-6410(02)00065-4)
- Teder-Sälejärvi, W. A., McDonald, J. J., Di Russo, F., & Hillyard, S. A. (2002b). An analysis of audiovisual crossmodal integration by means of event-related potential (ERP) recordings. *Cognitive Brain Research*, 14(1), 106-114. [https://doi.org/10.1016/S0926-6410\(02\)00065-4](https://doi.org/10.1016/S0926-6410(02)00065-4)
- Thillay, A., Lemaire, M., Roux, S., Houy-Durand, E., Barthélémy, C., Knight, R. T., Bidet-Caulet, A., & Bonnet-Brilhault, F. (2016). Atypical Brain Mechanisms of Prediction According to Uncertainty in Autism. *Frontiers in Neuroscience*, 10. <https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00317>
- Thurlow, W. R., & Kerr, T. P. (1970). Effect of a Moving Visual Environment on Localization of Sound. *The American Journal of Psychology*, 83(1), 112-118. <https://doi.org/10.2307/1420861>
- Thye, M. D., Bednarz, H. M., Herringshaw, A. J., Sartin, E. B., & Kana, R. K. (2018). The impact of atypical sensory processing on social impairments in autism spectrum disorder. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 29, 151-167. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2017.04.010>
- Todorova, G. K., Hatton, R. E. M., & Pollick, F. E. (2019). Biological motion perception in autism spectrum disorder : A meta-analysis. *Molecular Autism*, 10(1), 49. <https://doi.org/10.1186/s13229-019-0299-8>
- Tomchek, S. D., & Dunn, W. (2007). Sensory Processing in Children With and Without Autism : A Comparative Study Using the Short Sensory Profile. *The American Journal of Occupational Therapy*, 61(2), 190-200. <https://doi.org/10.5014/ajot.61.2.190>
- Tomchek, S. D., Little, L. M., Myers, J., & Dunn, W. (2018). Sensory Subtypes in Preschool Aged Children with Autism Spectrum Disorder. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 48(6), 2139-2147. <https://doi.org/10.1007/s10803-018-3468-2>
- Tromp, J., Peeters, D., Meyer, A. S., & Hagoort, P. (2018). The combined use of virtual reality and EEG to study language processing in naturalistic environments. *Behavior Research Methods*, 50(2), 862-869. <https://doi.org/10.3758/s13428-017-0911-9>
- Tröster, H., Brambring, M., & Beelmann, A. (1991). The age dependence of stereotyped behaviours in blind infants and preschoolers. *Child: Care, Health and Development*, 17(2), 137-157. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2214.1991.tb00684.x>

- Tsai, P. T., Hull, C., Chu, Y., Greene-Colozzi, E., Sadowski, A. R., Leech, J. M., Steinberg, J., Crawley, J. N., Regehr, W. G., & Sahin, M. (2012). Autistic-like behaviour and cerebellar dysfunction in Purkinje cell Tsc1 mutant mice. *Nature*, 488(7413), 647-651. <https://doi.org/10.1038/nature11310>
- Tsermentseli, S., O'Brien, J. M., & Spencer, J. V. (2008). Comparison of form and motion coherence processing in autistic spectrum disorders and dyslexia. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 38(7), 1201-1210. <https://doi.org/10.1007/s10803-007-0500-3>
- Turner-Brown, L. M., Baranek, G. T., Reznick, J. S., Watson, L. R., & Crais, E. R. (2013). The First Year Inventory: A longitudinal follow-up of 12-month-olds to 3 years of age. *Autism: the international journal of research and practice*, 17(5), 527-540. <https://doi.org/10.1177/1362361312439633>
- Tye, C., Asherson, P., Ashwood, K. L., Azadi, B., Bolton, P., & McLoughlin, G. (2014). Attention and inhibition in children with ASD, ADHD and co-morbid ASD + ADHD: An event-related potential study. *Psychological Medicine*, 44(5), 1101-1116. <https://doi.org/10.1017/S0033291713001049>
- Urwin, C. (1983). Dialogue and cognitive functioning in the early language development of three blind children. In A. E. Mills (Ed.), *Language acquisition in the blind child: Normal and deficient* (pp. 142-161). London: Croom Helm
- Van der Burg, E., Olivers, C. N. L., Bronkhorst, A. W., & Theeuwes, J. (2008). Pip and pop: Nonspatial auditory signals improve spatial visual search. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 34(5), 1053-1065. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.34.5.1053>
- van der Zwan, R., Machatch, C., Kozlowski, D., Troje, N. F., Blanke, O., & Brooks, A. (2009). Gender bending: Auditory cues affect visual judgements of gender in biological motion displays. *Experimental Brain Research*, 198(2-3), 373-382. <https://doi.org/10.1007/s00221-009-1800-y>
- Van Etten, H. M., Kaur, M., Srinivasan, S. M., Cohen, S. J., Bhat, A., & Dobkins, K. R. (2017). Increased Prevalence of Unusual Sensory Behaviors in Infants at Risk for, and Teens with, Autism Spectrum Disorder. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 47(11), 3431-3445. <https://doi.org/10.1007/s10803-017-3227-9>
- van Eijk, R. L. J., Kohlrausch, A., Juola, J. F., & van de Par, S. (2008). Audiovisual synchrony and temporal order judgments: Effects of experimental method and stimulus type. *Perception & Psychophysics*, 70(6), 955-968. <https://doi.org/10.3758/pp.70.6.955>
- van Laarhoven, T., Stekelenburg, J. J., & Vroomen, J. (2019). Increased sub-clinical levels of autistic traits are associated with reduced multisensory integration of audiovisual speech. *Scientific Reports*, 9(1), 9535. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46084-0>
- Vidal, J., Giard, M.-H., Roux, S., Barthélemy, C., & Bruneau, N. (2008). Cross-modal processing of auditory-visual stimuli in a no-task paradigm: A topographic event-related potential study. *Clinical Neurophysiology: Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 119(4), 763-771. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2007.11.178>
- Vittek, A.-L., Juan, C., Nowak, L. G., Girard, P., & Cappe, C. (2022). Multisensory integration in neurons of the medial pulvinar of macaque monkey. *Cerebral Cortex*, bhac337. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhac337>
- von dem Hagen, E. A. H., Nummenmaa, L., Yu, R., Engell, A. D., Ewbank, M. P., & Calder, A. J. (2011). Autism spectrum traits in the typical population predict structure and function in the posterior superior temporal sulcus. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, 21(3), 493-500. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhq062>
- von dem Hagen, E. A. H., Stoyanova, R. S., Baron-Cohen, S., & Calder, A. J. (2013). Reduced functional connectivity within and between 'social' resting state networks in autism spectrum conditions. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 8(6), 694-701. <https://doi.org/10.1093/scan/nss053>
- Voos, A. C., Pelphrey, K. A., & Kaiser, M. D. (2013). Autistic traits are associated with diminished neural response to affective touch. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 8(4), 378-386. <https://doi.org/10.1093/scan/nss009>
- Vroomen, J., de Gelder, B., & Vroomen, J. (2004). Temporal ventriloquism: Sound modulates the flash-lag effect. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 30(3), 513-518. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.30.3.513>

- Vuilleumier, P., Armony, J. L., Driver, J., & Dolan, R. J. (2003). Distinct spatial frequency sensitivities for processing faces and emotional expressions. *Nature Neuroscience*, 6(6), 624-631. <https://doi.org/10.1038/nn1057>
- Walker-Andrews, A. S., & Grolnick, W. (1983). Discrimination of vocal expressions by young infants. *Infant Behavior and Development*, 6(4), 491-498. [https://doi.org/10.1016/S0163-6383\(83\)90331-4](https://doi.org/10.1016/S0163-6383(83)90331-4)
- Walker-Andrews, A. S., & Lennon, E. M. (1985). Auditory-Visual Perception of Changing Distance by Human Infants. *Child Development*, 56(3), 544-548. <https://doi.org/10.2307/1129743>
- Wallace, M. T., & Stevenson, R. A. (2014a). The construct of the multisensory temporal binding window and its dysregulation in developmental disabilities. *Neuropsychologia*, 64, 105-123. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.08.005>
- Wallace, M. T., & Stevenson, R. A. (2014b). The Construct of the Multisensory Temporal Binding Window and its Dysregulation in Developmental Disabilities. *Neuropsychologia*, 64, 105-123. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.08.005>
- Walter, W. G., Cooper, R., Aldridge, V. J., Mccallum, W. C., & Winter, A. L. (1964). CONTINGENT NEGATIVE VARIATION : AN ELECTRIC SIGN OF SENSORIMOTOR ASSOCIATION AND EXPECTANCY IN THE HUMAN BRAIN. *Nature*, 203, 380-384. <https://doi.org/10.1038/203380a0>
- Wang, Y., Celebrini, S., Trotter, Y., & Barone, P. (2008). Visuo-auditory interactions in the primary visual cortex of the behaving monkey : Electrophysiological evidence. *BMC Neuroscience*, 9, 79. <https://doi.org/10.1186/1471-2202-9-79>
- Watanabe, K., & Shimojo, S. (2001). When Sound Affects Vision : Effects of Auditory Grouping on Visual Motion Perception. *Psychological Science*, 12(2), 109-116. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00319>
- Watson, L. R., Patten, E., Baranek, G. T., Poe, M., Boyd, B. A., Freuler, A., & Lorenzi, J. (2011). Differential associations between sensory response patterns and language, social, and communication measures in children with autism or other developmental disabilities. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research: JSLHR*, 54(6), 1562-1576. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2011/10-0029\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2011/10-0029))
- Wei, P., Liu, N., Zhang, Z., Liu, X., Tang, Y., He, X., Wu, B., Zhou, Z., Liu, Y., Li, J., Zhang, Y., Zhou, X., Xu, L., Chen, L., Bi, G., Hu, X., Xu, F., & Wang, L. (2015). Processing of visually evoked innate fear by a non-canonical thalamic pathway. *Nature Communications*, 6(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/ncomms7756>
- Westwood, D. A., Heath, M., & Roy, E. A. (2001). The accuracy of reaching movements in brief delay conditions. *Canadian Journal of Experimental Psychology = Revue Canadienne De Psychologie Experimentale*, 55(4), 304-310. <https://doi.org/10.1037/h0087377>
- Whitehouse, A. J. O., & Bishop, D. V. M. (2008). Do children with autism 'switch off' to speech sounds? An investigation using event-related potentials. *Developmental Science*, 11(4), 516-524. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00697.x>
- Wickelgren, I. (2005). Neurology. Autistic brains out of synch? *Science (New York, N.Y.)*, 308(5730), 1856-1858. <https://doi.org/10.1126/science.308.5730.1856>
- Wiefferink, C. H., Rieffe, C., Ketelaar, L., & Frijns, J. H. M. (2012). Predicting social functioning in children with a cochlear implant and in normal-hearing children : The role of emotion regulation. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 76(6), 883-889. <https://doi.org/10.1016/j.ijporl.2012.02.065>
- Wiggins, L. D., Robins, D. L., Adamson, L. B., Bakeman, R., & Henrich, C. C. (2012). Support for a dimensional view of autism spectrum disorders in toddlers. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 42(2), 191-200. <https://doi.org/10.1007/s10803-011-1230-0>
- Williams, D. (1992). *Nobody nowhere* (Doubleday).
- Williams, D. (1999). *Nobody Nowhere : The Remarkable Autobiography of an Autistic Girl*. Jessica Kingsley Publishers.
- Williams, J. H. G., Massaro, D. W., Peel, N. J., Bosseler, A., & Suddendorf, T. (2004). Visual-auditory integration during speech imitation in autism. *Research in Developmental Disabilities*, 25(6), 559-575. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2004.01.008>

- Williams, M. S., & Shellenberger, S. (1996). *How does your engine run? : A leader's guide to the alert program for self-regulation* (TherapyWorks, Inc.).
- Wilson, T. W., Rojas, D. C., Reite, M. L., Teale, P. D., & Rogers, S. J. (2007). Children and adolescents with autism exhibit reduced MEG steady-state gamma responses. *Biological Psychiatry*, 62(3), 192-197. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2006.07.002>
- Wing, L. (1988). The continuum of autistic characteristics. In *Diagnosis and assessment in autism* (p. 91-110). Plenum Press. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0792-9_7
- Wing, L., & Gould, J. (1979). Severe impairments of social interaction and associated abnormalities in children : Epidemiology and classification. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 9, 11-29. <https://doi.org/10.1007/BF01531288>
- Woynaroski, T. G., Kwakye, L. D., Foss-Feig, J. H., Stevenson, R. A., Stone, W. L., & Wallace, M. T. (2013). Multisensory Speech Perception in Children with Autism Spectrum Disorders. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 43(12), 2891-2902. <https://doi.org/10.1007/s10803-013-1836-5>
- Xavier, J., Vignaud, V., Ruggiero, R., Bodeau, N., Cohen, D., & Chaby, L. (2015). A Multidimensional Approach to the Study of Emotion Recognition in Autism Spectrum Disorders. *Frontiers in Psychology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01954>
- Yaguchi, A., & Hidaka, S. (2018). Distinct Autistic Traits Are Differentially Associated With the Width of the Multisensory Temporal Binding Window. *Multisensory Research*, 31(6), 523-536. <https://doi.org/10.1163/22134808-00002612>
- Zhou, H.-Y., Yang, H.-X., Shi, L.-J., Lui, S. S. Y., Cheung, E. F. C., & Chan, R. C. K. (2021). Correlations Between Audiovisual Temporal Processing and Sensory Responsiveness in Adolescents with Autistic Traits. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 51(7), 2450-2460. <https://doi.org/10.1007/s10803-020-04724-9>
- Zielinski, B. A., Prigge, M. B. D., Nielsen, J. A., Froehlich, A. L., Abildskov, T. J., Anderson, J. S., Fletcher, P. T., Zygumt, K. M., Travers, B. G., Lange, N., Alexander, A. L., Bigler, E. D., & Lainhart, J. E. (2014). Longitudinal changes in cortical thickness in autism and typical development. *Brain: A Journal of Neurology*, 137(Pt 6), 1799-1812. <https://doi.org/10.1093/brain/awu083>
- Zietz, K., & Werner, H. (1927). Über die dynamische Struktur der Bewegung. Werner's Studien über Strukturgesetze, VIII. [On the dynamic structure of movement. Werner's studies on the laws of structure, VIII]. *Zeitschrift für Psychologie*, 105, 226-249.
- Zilbovicius, M., Saitovitch, A., Popa, T., Rechtman, E., Diamandis, L., Chabane, N., Brunelle, F., Samson, Y., & Boddaert, N. (2013). Autism, social cognition and superior temporal sulcus. *Open Journal of Psychiatry*, 03(02), 46-55. <https://doi.org/10.4236/ojpsych.2013.32A008>
- Zwaigenbaum, L., Bryson, S., Rogers, T., Roberts, W., Brian, J., & Szatmari, P. (2005). Behavioral manifestations of autism in the first year of life. *International Journal of Developmental Neuroscience: The Official Journal of the International Society for Developmental Neuroscience*, 23(2-3), 143-152. <https://doi.org/10.1016/j.ijdevneu.2004.05.001>