



Comprendre une interaction sociale par le corps en action : contribution de mécanisme miroir et implication dans l'autisme

Laurie Centelles

► To cite this version:

Laurie Centelles. Comprendre une interaction sociale par le corps en action : contribution de mécanisme miroir et implication dans l'autisme. Histoire, Philosophie et Sociologie des sciences. Université Victor Segalen - Bordeaux II, 2009. Français. <tel-00475673>

HAL Id: tel-00475673

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00475673>

Submitted on 22 Apr 2010

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.

UNIVERSITE VICTOR SEGALEN BORDEAUX 2
ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES SOCIALES
DOCTORAT DES SCIENCES DE LA COGNITION

COMPRENDRE UNE INTERACTION SOCIALE

PAR LE CORPS EN ACTION :

Contribution du mécanisme miroir et implication dans l'autisme

Laurie Centelles

Co-direction réalisée par les Professeurs Bernard Bioulac et Manuel Bouvard

Soutenue publiquement le 10 juillet 2009

Jury composé de :

Docteur Joëlle Martineau, Unité 930 INSERM, Tours	<i>Rapporteur</i>
Professeur Carole Tardif, Université de Provence, Aix-en-Provence	<i>Rapporteur</i>
Docteur Edouard Gentaz, CNRS 5105, Grenoble	<i>Examineur</i>
Professeur Bernadette Rogé, Université de Toulouse Le Mirail, Toulouse	<i>Examineur</i>
Docteur Christina Schmitz, CNRS 6149, Marseille	<i>Examineur</i>
Professeur Bernard Bioulac, CNRS 5227, Bordeaux	<i>Codirecteur</i>
Professeur Manuel Bouvard, Hôpital Charles Perrens, Bordeaux	<i>Codirecteur</i>

*« Si je n'avais plus de voix, je jouerais avec mes mains.
Si je n'avais plus de mains, je jouerais avec mes pieds.
Si je n'avais plus de pieds, je jouerais avec mon corps. »*

Giorgio Strehler (1921-1997), homme de théâtre

« If we knew what we were doing, it wouldn't be called research, would it? »

Albert Einstein (1879-1955), homme de science

« Le corps est éminemment un espace expressif. Mais il n'est pas un espace expressif parmi d'autres, il est l'origine de tous les autres, ce qui projette au dehors les significations en leur donnant un lieu, ce qui fait d'elles qu'elles se mettent à exister comme des choses, sous nos mains, sous nos yeux. Notre corps est en ce sens ce qui dessine et fait vivre le monde, notre moyen général d'avoir un monde. »

Maurice Merleau-Monty (1908-1961), homme de lettres

Je voudrais tout d'abord remercier les membres du jury pour avoir évalué minutieusement ce manuscrit de thèse et m'avoir offert cet agréable et riche échange lors de la soutenance. Merci tout particulièrement au docteur Joëlle Martineau et au professeur Carole Tardif de m'avoir fait l'honneur d'expertiser ce travail et d'avoir enrichi son contenu par leurs remarques et critiques, au professeur Bernadette Rogé et au docteur Christina Schmitz pour avoir ouvert de nouvelles perspectives et au docteur Edouard Gentaz pour avoir présidé avec dynamisme la soutenance de cette thèse.

De ces longues années de thèse, je retiendrai, surtout et avant tout, les personnes qui m'ont montré le chemin de la recherche et de l'autisme. Je remercie chacune d'entre elles pour avoir motivé chacun de mes choix universitaires et suscité autant de passion et de conviction. Merci de m'avoir transmis le flambeau de l'esprit scientifique, de m'avoir soutenue, conseillée et toujours cru en moi ! La réussite et l'épanouissement d'un doctorant sont d'abord le fruit d'un environnement de travail chaleureux, d'un savoir partagé et de la passion du métier. Dans l'ordre de nos rencontres...

Je voudrais remercier le docteur Gloria Laxer et madame Mireille Lemahieu. Elles sont toutes deux à l'origine de cette aventure. De leurs rencontres, durant mes années d'IUT à Clermont-Ferrand, est née cette volonté de travailler sur la pathologie de l'autisme. Sans cette étincelle, ce travail de thèse n'aurait peut-être jamais existé...

Je tiens à remercier le professeur Mohamed Jaber qui, grâce à l'intelligence de ses cours, m'a faite basculer de la Microbiologie vers les Neurosciences. Les études chez la souris m'ont fait prendre conscience que les Neurosciences moléculaires et intégratives étaient indispensables pour comprendre l'être humain. Merci pour ce changement de cap !

En dépit d'une thématique bien différente (« le modèle murin de la dégénérescence striato-nigrique »), les stages de master sous la responsabilité du professeur François Tison constituent véritablement mes premiers pas dans la recherche. Chaperonnée par le docteur Elsa Diguët, j'ai découvert l'intrigue scientifique et l'élaboration « home made » de tests comme la fameuse piscine de Morris ! Merci à vous, François, d'avoir gardé un œil bienveillant sur mon évolution et de m'avoir toujours ouvert votre porte.

Je remercie le docteur Jean-René Cazalets d'avoir mis en relation avec beaucoup d'énergie et de rapidité chacun des partenaires de ce projet de thèse. Le titre de « parrain de

thèse » a pris tout son sens. L'histoire initialement bordelaise a pris des couleurs marseillaises. C'est ainsi que j'ai compris l'importance des « réseaux » et à quel point le monde scientifique était finalement tout petit.

Je remercie le professeur Bernard Bioulac pour m'avoir accueillie dans son laboratoire et ce, bien avant la thèse. Je remercie le professeur Manuel Bouvard pour m'avoir ouvert les portes de son service de Pédopsychiatrie et permis de rencontrer les enfants atteints d'autisme. En tant que co-directeur, je le remercie pour nos échanges efficaces, pour la confiance qu'il m'a accordée et qui m'a rendue autonome.

Je tiens à remercier du fond du cœur le groupe Développement et Pathologie de l'Action de Marseille dirigé avec enthousiasme par le docteur Christine Assaiante. Cette équipe initialement d'accueil est véritablement devenue celle qui m'a vue grandir.

Je te remercie, Christine, pour ta « positive attitude » de tous les instants qui maintient au sein de ton équipe une ambiance agréable et tellement humaine. Merci d'avoir vu en couleurs même quand je n'y voyais que du noir.

Merci au docteur Marianne Vaugoyeau pour avoir rendu possible ces petits bonhommes en points. Merci pour tes prouesses techniques, ton écoute et tes « reboostages » express. Tes « grob » font toujours du bien !

Merci au docteur Marianne Jover de m'avoir montré comment tu « travaillais » avec les enfants, de m'avoir fait confiance pour t'épauler à la Timone et à Toulouse avec les enfants dyspraxiques et tout-venants et de m'avoir consacré ce fameux long dimanche d'été !

Merci au docteur Nicole Malfait qui m'accompagnait le samedi et souvent le dimanche au labo. Bien que concentrées l'une sur un dispositif expérimental en gestation, l'autre sur l'inspiration de la rédaction, ce fut agréable de ne pas se savoir seule !

Merci aux jeunes docteurs Sophie et Sébastien d'avoir été mes premiers compagnons de thèse, du temps de Joseph Aiguier. « Dropinette », la thèse n'a été qu'un moyen de nous rencontrer, longue vie à notre amitié.

Merci aux p'tits loulous, Fanny et Pierre-Yves, avec qui j'ai partagé le bureau et surtout mes logorrhées. Un grand bravo pour avoir supporté mes folles amplitudes d'humeur et mes réflexions en live !! Votre présence m'a fait beaucoup de bien et vous m'avez permis très souvent de clarifier mes idées, si si !!

Merci au docteur Médéric, « mi-kid, mi-belette », tu as débloqué mon esprit pour construire le power point et tu restes le sportif à sensations le plus philosophe que je connaisse !

Merci enfin au docteur Christina Schmitz. Cette thèse est née de notre interaction, et combien cette interaction a été intense, riche et passionnée. Dans ces quelques mots, je souhaiterais exprimer tout mon respect pour ta personne, pour tes connaissances et pour ta générosité. Tu m'as appris à chercher, à inventer, à exprimer et à partager la science. Merci de prouver, par ta présence, que le monde de la recherche peut être beau et vrai. Sache que tu as été une directrice de thèse « sur mesure » !

Un merci teinté de beaucoup d'amitié aux IRM-istes, les docteurs Muriel Roth, Bruno Nazarian et Jean-Luc Anton. Ce voyage au centre du cerveau a comblé ma curiosité scientifique. Après de nombreuses discussions, merci également de nous avoir laissé carte blanche pour amener dans l'ancre de l'aimant nos petites têtes blondes !!

Un clin d'œil aux brefs échanges entretenus avec le docteur Bruno Wicker. Dommage que tu sois toujours par monts et par vaux, j'aurais bien aimé profiter de ce que tu sais ! Un jour peut-être...

Une dédicace spéciale à l'attention du docteur Henri Burnet en cette fin de parcours. Tu es parvenu à me transmettre le virus des statistiques et ce n'était pourtant pas gagné ! Je te remercie d'avoir fait de cet outil, un moyen plus digeste et nécessaire pour faire parler mes données comportementales. Tes longues explications ont été plus que profitables. J'espère avoir appris l'intégrité statisticienne !!

Cette thèse s'est construite sur des allers-retours entre Marseille et Bordeaux puis Bordeaux et Marseille... Je remercie l'équipe clinique du Centre de Ressources Autisme représentée notamment par Kattalin Etchegoyhen, les Sylvie, Stéphanie Segara, Valérie Graffaille et toutes les personnes que j'ai croisées de temps à autre. Je remercie aussi les membres du PQR : les docteurs Colette Fabrigoule et Willy Mayo pour m'avoir offert un espace de discussion durant mon séjour bordelais. Un clin d'œil d'encouragement à la « future docteure » Marion Amirault pour avoir été ma copine de labeur et ma coloc' de bureau : à deux, les situations sont toujours plus supportables !

Une pensée à tous les enfants autistes et enfants tout-venants pour avoir grandement contribué à ce travail. Merci aux aventuriers en herbe d'avoir relevé le défi de l'IRMf. Merci à tous les parents de m'avoir confié leurs trésors et d'avoir porté un intérêt à cette recherche.

Je souhaiterais remercier la Fondation Orange pour le soutien financier qu'elle m'a offert à deux reprises. Outre l'intérêt qu'elle a porté à mon projet de recherche sur l'autisme,

cette fondation a été une aide précieuse pour assurer de façon pérenne mes travaux. J'espère avoir fait honneur à la confiance qui m'a été accordée.

J'adresse mes meilleurs souvenirs aux participants que j'ai croisés dans de formidables congrès notamment l'université d'automne de l'ARAPI au Croisic (2005), l'école d'hiver de Kitzbühel (2006) et récemment le congrès IRLA de Tours (2009). Ces moments sont intenses et redonnent tellement confiance.

Une thèse est un bout de vie, et la vie se déroule aussi (et heureusement !) en dehors du labo. Je souhaiterais offrir ces dernières lignes à mon « petit monde », habité par mes cher(e)s et fidèles ami(e)s et ma lumineuse famille ...

A celles et ceux qui ont organisé des moments festifs (et certains jusqu'au bout !!) : Gosia, Mumu, Jérôme Cap, Magda & Dan, Nanou & P'tit Bonhomme...

A celles et ceux qui ont tenté de libérer mon corps et mon esprit par les vertus du théâtre : la troupe du Roy d'Espagne (saison 2004-2005) et les Trolliens (saison 2006-2007).

A celles et ceux qui ont pensé à moi en toute discrétion et toujours au bon moment : Milie, la « tribu », Fabienne, Cécile...

A celles qui ont lu mes pages avec un œil neuf... Diane, Sandra et à celle qui a cherché la p'tite bête pour parfaire la version finale : Angéline.

A tous ceux qui m'ont rendu la vie plus facile : Christiane et Jean-Claude, les Triay, les Grandjean, Patou la nounou, et tant d'autres...

A mon petit grand frère pour m'avoir écoutée avec patience et sagesse, à Camille pour avoir soutenu mon frère quand il me soutenait. A mes parents, qu'ils le veuillent ou non, qui doivent être fiers de ce que je suis dans la vie, ils y ont contribué ! A ma famille pleine de taties et de tontons, de cousines et de cousins, et de mes deux précieuses mamies à qui je le répète « Je ne suis pas un docteur qui soigne ! »

A Jérôme et Soléa : mes essentiels, mon énergie, mon équilibre... Jérôme, cette aventure, tu l'as « endurée » avec moi, à nous deux, rien d'impossible ! Soléa, je vais prendre le temps de te voir grandir, parole de maman !

Une page se tourne, un jour se lève...

RESUME

Le langage du corps tient une place prépondérante dans la communication sociale et ceci dès la petite enfance. L'objectif de ce travail de thèse est de déterminer la contribution du corps en action dans la compréhension des interactions sociales (IS). L'approche développementale nous renseigne sur les mécanismes présidant à sa mise en place chez l'enfant, être éminemment social. En revanche dans l'autisme, trouble neurodéveloppemental complexe, la dimension sociale est altérée. Nos études questionnent dans cette pathologie l'utilisation de l'information portée par le corps en mouvement, dans un contexte social.

L'originalité de notre paradigme expérimental repose sur l'utilisation de mouvements humains (MH), ou animations en points lumineux, qui permettent d'isoler l'information sociale portée par le corps en action. Nous avons présenté à nos sujets des scènes visuelles présentant deux acteurs engagés dans une interaction sociale ou pas. Une double approche, comportementale et en IRMf, nous éclaire sur l'utilisation et la mise en place de la simulation motrice et nous permet de questionner son implication dans l'autisme.

Nous montrons que les enfants entre 4 et 6 ans et les enfants autistes utilisent les informations visuelles portées par le MH pour comprendre une IS, bien que leurs performances ne soient pas encore optimales. Chez l'adulte, en plus du réseau de la mentalisation attendu, nous avons mis en évidence l'importance du réseau des mécanismes miroirs dans la cognition sociale. Chez l'enfant, l'IRMf nous a permis de rapporter pour la première fois un recrutement fonctionnel précoce du gyrus frontal inférieur, siège du système des neurones miroirs, lors de l'observation des scènes sociales.

La discussion générale établit un lien étroit entre la mise en place du mécanisme miroir et la construction des représentations de l'action, elle interroge aussi l'intégrité de ce processus dans l'autisme. En conclusion, ces études ouvrent la voie au rôle fondateur du mécanisme miroir dans le développement social de l'enfant.

Mots clés : Cognition sociale, enfant, autisme, mécanismes miroirs, mouvement humain, IRMf

ABSTRACT

Body language plays a major role in social communication. The overall aim of this thesis is to enlighten the contribution of the body in action in social interaction (SI) understanding. A developmental approach reveals the mechanisms responsible for the set-up of social abilities in children, who by nature are extensively social. In autism, a complex developmental disorder, on the contrary the social dimension is deeply affected. Our studies tackle the use of information carried by the body in action, in a social context in this pathology.

The originality of our experimental paradigm relies on the use of human motion (HM), or point-light animations, that enable to isolate the social information carried by the body in action only. Subjects watched two actors engaged or not in a social interaction. A two-fold approach, behavioral and using fMRI, reveals the use and the set-up of motor simulation and questions its implication in autism.

Children from 4- to 6-years of age and children with autism make use of visual information extracted from HM to understand SI, even though their performance does not reach those of adults. In adults, beyond the mentalizing network, we enlighten the importance of the mirror-neuron system for social cognition. In children, fMRI revealed the early functional recruitment of the inferior frontal gyrus, which is part of the mirror-neuron system, during the observation of social scenes.

The general discussion establishes a tight link between the set-up of the mirroring system and the building of action representations. We also question the integrity of this process in autism. In conclusion, these studies bring to light the fundamental role of the mirroring mechanism in the social development of a child.

Key words : Social cognition, child, autism, mirror system, human motion, fMRI

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CADRE THEORIQUE.....	5
I. La cognition sociale.....	6
I. 1. Comment se développe la compréhension d'une interaction sociale ?.....	6
I. 1. 1. L'expérience du corps : connaissance de soi.....	6
I. 1. 1. 1. Le corps différencié : perception visuelle et action.....	7
I. 1. 1. 2. Le corps situé et agent dans l'environnement.....	8
I. 1. 1. 3. Le corps organisé : l'apparition d'un schéma corporel.....	9
I. 1. 2. L'exploration et le partage.....	11
I. 1. 3. La « co-conscience » de soi et des autres.....	12
I. 1. 4. L'imitation au service des interactions sociales.....	13
I. 2. Mécanismes sous-jacents à la compréhension d'une interaction sociale.....	14
I. 2. 1. Observation d'une action intentionnelle.....	15
I. 2. 1. 1. Définition d'une action intentionnelle.....	15
I. 2. 1. 2. Le sillon temporal supérieur.....	15
I. 2. 2. Attribution des états mentaux.....	16
I. 2. 2. 1. Définition de la théorie de l'esprit.....	16
I. 2. 2. 2. Deux courants théoriques.....	17
I. 2. 2. 3. Le réseau de la mentalisation.....	17
I. 2. 2. 4. Développement du réseau de la mentalisation.....	19
I. 2. 3. Le mécanisme miroir.....	22
I. 2. 3. 1. La découverte des neurones miroirs chez le singe.....	22
I. 2. 3. 2. Les caractéristiques du mécanisme miroir chez l'homme.....	23
I. 2. 3. 3. Le « mécanisme miroir ».....	26
II. Reconnaître le mouvement humain.....	29
II. 1. Etudier le mouvement humain (MH).....	29
II. 1. 1. Petit historique sur le modèle de référence.....	30
II. 1. 2. Deux théories explicatives.....	32
II. 1. 2. 1. La théorie de l'expérience visuelle.....	32
II. 1. 2. 2. La théorie du couplage de la perception et de l'action.....	32
II. 2. Origines et mécanismes de la reconnaissance du MH.....	34
II. 2. 1. Analyse visuelle de la perception du MH.....	34

II. 2. 1. 1. Les invariants de la perception du MH	34
II. 2. 1. 2. Mécanisme global ou local : Forme ou mouvement?	36
II. 2. 1. 3. Mécanisme ascendant ou descendant ?	39
II. 2. 2. Apport de la phylogénèse et de l'ontogénèse	40
II. 2. 3. Rôle de l'expérience motrice	43
II. 3. Les régions cérébrales de la perception du MH	46
II. 3. 1. Quand le flux lumineux devient une image	46
II. 3. 2. Quand les voies dorsale et ventrale rencontrent le sillon temporal supérieur	47
II. 3. 2. 1. La spécificité du sillon temporal supérieur	47
II. 3. 2. 2. La complémentarité des voies dorsale et ventrale.....	49
II. 3. 3. Quand la perception du MH active des régions sensori-motrices.....	50
II. 3. 4. Quand le mouvement humain devient du mouvement social	51
III. Le spectre de l'autisme	53
III. 1. Un syndrome comportemental	53
III. 1. 1. La triade de symptômes.....	53
III. 1. 2. L'autisme en chiffres.....	57
III. 2. Une étiologie multigénique.....	58
III. 2. 1. Les pistes vers une origine génétique	58
III. 2. 1. 1. L'héritabilité de l'autisme.....	58
III. 2. 1. 2. La co-morbidité avec des pathologies d'origine génétique	59
III. 2. 1. 3. Facteurs épigénétiques et environnementaux	59
III. 2. 2. Hétérogénéité des mutations géniques	61
III. 2. 2. 1. Mutations spontanées fréquentes.....	61
III. 2. 2. 2. Exemples d'altérations de gènes neuro-développementaux	62
III. 3. Des anomalies neuro-anatomiques précoces	65
III. 3. 1. Développement cérébral atypique	65
III. 3. 2. Des particularités anatomiques.....	66
III. 3. 2. 1. Surcroissance régionale chez l'enfant.....	66
III. 3. 2. 2. Ralentissement régional chez l'adulte	67
III. 3. 3. Anomalie de la myélinisation.....	68
III. 4. Théories cognitives et leurs corrélats cérébraux.....	69
III. 4. 1. Cohérence centrale	70
III. 4. 1. 1. La théorie cognitive	70
III. 4. 1. 2. Les corrélats centraux sollicités.....	71
III. 4. 2. Fonctions exécutives	72
III. 4. 2. 2. La théorie cognitive	72
III. 4. 2. 2. Les corrélats centraux sollicités.....	73

III. 4. 3. Théorie de l'esprit	74
III. 4. 3. 1. La théorie cognitive	75
III. 4. 3. 2. Les corrélats centraux sollicités	77
III. 5. La perception sociale dans l'autisme	78
III. 5. 1. Perception visuelle du mouvement	78
III. 5. 2. Reconnaissance du mouvement « social »	80
III. 5. 2. 1. Identification du mouvement humain	80
III. 5. 2. 2. Observation de l'action	83
III. 5. 2. 3. Attribution de l'intention	84
III. 5. 3. Implication du mécanisme miroir ?	85
MATERIEL ET METHODES	86
I. Les animations en points lumineux	87
I. 1. Les différents types d'animations	87
I. 1. 1. Elaboration des animations	87
I. 1. 2. Les interactions sociales (IS)	89
I. 1. 3. Les non-interactions sociales (NIS)	90
I. 1. 4. Différentes perspectives et angles de vue des IS et NIS	90
I. 1. 5. Deux modes de présentation du MH	91
I. 1. 6. Situation contrôle de l'étude chez l'enfant avec autisme	92
I. 2. Etudes préliminaires exploratoires	92
I. 2. 1. Validation des stimuli visuels	93
I. 2. 1. 1. Protocole expérimental	93
I. 2. 1. 2. Bilan	93
I. 2. 2. Estimation de l'intensité émotionnelle des IS	94
I. 2. 2. 1. Protocole expérimental	94
I. 2. 2. 2. Résultats	95
II. Groupes expérimentaux	96
II. 1. Etude comportementale en développement typique	96
II. 2. Etudes en imagerie cérébrale fonctionnelle	96
II. 2. 1. Population adulte	97
II. 2. 2. Population enfant	97
II. 3. Etude en développement pathologique	97
II. 3. 1. Enfants avec autisme	97
II. 3. 2. Enfants au développement typique	98

III. Etudes comportementales sur la reconnaissance des interactions sociales	99
III. 1. Etude en développement typique	99
III. 2. Etude adaptée aux enfants avec autisme	100
III. 2. 1. Protocole expérimental.....	100
III. 2. 1. 1. Epreuve visuo-motrice simple	101
III. 2. 1. 2. Epreuve de perception du mouvement humain.....	101
III. 2. 1. 3. Epreuve de reconnaissance des interactions sociales.....	102
III. 3. Paramètres enregistrés et outils statistiques	104
III. 3. 1. Paramètres enregistrés.....	104
III. 3. 1. 1. Etude en développement typique.....	104
III. 3. 1. 2. Etude adaptée aux enfants avec autisme	104
III. 3. 2. Outils statistiques	105
III. 3. 2. 1. Etude en développement typique.....	106
III. 3. 2. 2. Etude adaptée aux enfants avec autisme	107
IV. L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle	109
IV. 1. L'IRM fonctionnelle (IRMf).....	109
IV. 1. 1. Bases neurophysiologiques du signal en IRMf.....	109
IV. 1. 2. La technique de séquence écho-planaire	110
IV. 1. 3. Avantages et limites de la méthode BOLD	111
IV. 2. Choix du dessin expérimental.....	113
IV. 2. 1. Choix des conditions expérimentales : Méthode soustractive.....	113
IV. 2. 2. Choix des paramètres temporels de la stimulation	114
IV. 2. 3. Acquisition des données en IRMf.....	115
IV. 2. 4. Procédure expérimentale	116
IV. 3. Le prétraitement des images.....	119
IV. 3. 1. Correction des décalages temporels (<i>slice timing</i>)	120
IV. 3. 2. Correction du mouvement (<i>realign</i>).....	121
IV. 3. 3. Recalage intramodalité (<i>coregister</i>)	122
IV. 3. 4. Normalisation spatiale (<i>normalize</i>)	122
IV. 3. 5. Lissage spatial (<i>smoothing</i>).....	123
IV. 3. 6. Considérations méthodologiques spécifiques à l'étude chez l'enfant	123
IV. 4. Analyses par cartographie statistique paramétrée	125
IV. 4. 1. Spécification du modèle	126
IV. 4. 2. Estimation des paramètres du modèle et des contrastes	127

IV. 5. Localisations anatomiques	129
--	-----

RESULTATS EXPERIMENTAUX..... 131

I. Reconnaissance des interactions sociales au cours du developpement

.....	132
-------	------------

I. 1. Questions posées	132
-------------------------------------	------------

I. 2. Résultats	133
------------------------------	------------

I. 2. 1. Profil des réponses au cours de l'épreuve	133
--	-----

I. 2. 2. Effet de la catégorie : IS versus NIS ?	134
--	-----

I. 2. 2. 1. A partir de quel l'âge une IS (ou une NIS) est-elle aussi bien reconnue qu'à l'âge adulte ?	
---	--

.....	134
-------	-----

I. 2. 2. 2. A un âge donné, les enfants reconnaissent-ils mieux IS ou NIS ?.....	135
--	-----

I. 2. 3. Effet du mode de présentation : stick <i>versus</i> point ?.....	136
---	-----

I. 2. 4. Description qualitative des IS reconnues ou non reconnues	137
--	-----

I. 3. Discussion	139
-------------------------------	------------

Un accès précoce à l'état mental de l'autre	139
---	-----

Compréhension sociale et langage	139
--	-----

Développement des compétences de catégorisation.....	141
--	-----

Représentations sociales et représentations de l'action : le rôle de l'expérience vécue	142
---	-----

Représentation de l'action et simulation motrice : une étape vers la compréhension des IS.....	143
--	-----

II. Capacité de reconnaissance des interactions sociales chez des enfants avec autisme 145

II. 1. Questions posées.....	145
-------------------------------------	------------

II. 2. Résultats.....	146
------------------------------	------------

II. 2. 1. Temps de réaction visuo-moteur.....	146
---	-----

II. 2. 2. Epreuve de détection de mouvements humains	146
--	-----

II. 2. 3. Profil des réponses au cours de l'épreuve.....	147
--	-----

II. 2. 4. Effet de la catégorie : IS <i>versus</i> NIS ?	148
--	-----

II. 2. 4. 1. Performance	148
--------------------------------	-----

II. 2. 4. 2. Temps de réaction	148
--------------------------------------	-----

II. 2. 5. Effet du mode de présentation : Point <i>versus</i> Stick ?.....	150
--	-----

II. 2. 5. 1. Performance	150
--------------------------------	-----

II. 2. 5. 2. Temps de réaction	151
--------------------------------------	-----

II. 2. 6. Lien entre niveau intellectuel et performance chez les enfants avec autisme ?	151
---	-----

II. 2. 7. Effet de l'intensité émotionnelle ?	152
---	-----

II. 2. 8. Description qualitative des IS reconnues ou non reconnues.....	153
II. 3. Discussion	155
La perception du MH : une étape réussie.....	155
... mais des difficultés pour catégoriser les interactions sociales.....	156
Utilisation d'une stratégie visuo-spatiale ? L'intérêt de l'oculomotricité	158
III. Identification des réseaux sous-tendant la reconnaissance des interactions sociales	160
III. 1. Question posée	160
III. 2. Résultats	160
III. 2. 1. Performances comportementales.....	160
III. 2. 2. Contraste IS > NIS	161
III. 3. Discussion.....	163
Contribution des processus attentionnels	163
Des régions impliquées dans le traitement de la forme du corps et le mouvement humain	164
Le réseau de la mentalisation : attribution du « sens social ».....	166
Le réseau du couplage de la perception et de l'action : compréhension d'une interaction sociale par le corps en mouvement.....	168
IV. Maturation des réseaux sous-tendant la reconnaissance des interactions sociales	171
IV. 1. Questions posées	171
IV. 2. Résultats	172
IV. 2. 1. Performances comportementales.....	172
IV. 2. 2. Contraste IS > NIS chez l'enfant.....	172
IV. 2. 3. Différences entre adultes et enfants	174
IV. 2. 4. Variations d'activité liées à l'âge des enfants	175
VI. 3. Discussion.....	177
Mise en place précoce du réseau de la mentalisation	177
Mise en évidence d'un réseau des mécanismes miroirs chez l'enfant.....	178
Traitement visuel de recherche de contours plus prononcé chez l'enfant	179
DISCUSSION GENERALE.....	182
CONCLUSION.....	197

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	199
INDEX DES TABLEAUX	225
INDEX DES FIGURES.....	228
PUBLICATIONS	233
ANNEXES.....	238

INTRODUCTION GENERALE

« Les gens autistes se parlent-ils dans leur tête ? »

Un enfant pertinent

« Vos personnages ressemblent à des constellations. »

Pendant une session de poster

« Le spectre de l'autisme, c'est comme un arc-en-ciel où tu es plus ou moins autiste. »

Un poète réaliste

« Quand on réfléchit, le cerveau s'allume. »

Un collégien en réflexion

« Moi, j'aime les points. »

Les mots du cœur

« A un moment donné, j'ai eu envie d'aller aux toilettes, tu l'as vu ? »

Un enfant pendant l'étude en IRMf

« Chercheur, ce n'est pas un métier. »

Avant-gardiste de l'ANPE

« Parle avec ton corps », me répétait mon prof de théâtre...

Cette thèse a été réalisée dans le cadre d'une collaboration entre le laboratoire bordelais « Mouvement, Adaptation et Cognition » dirigé par le docteur Jean-René Cazalets (UMR 5227) et le groupe marseillais « Développement et Pathologie de l'Action » dirigé par le docteur Christine Assaiante (UMR 6149, dirigée par le docteur Christian Xerri). Les études en IRMf se sont déroulées au centre d'IRMf du CHU de la Timone à Marseille. Le travail avec les enfants atteints d'autisme a eu lieu au Centre de Ressources Autisme de Bordeaux. Ce travail a bénéficié d'un soutien de la Fondation Orange par l'obtention d'une bourse de doctorat.

Dans ce travail de thèse, je me suis attachée à l'expression du corps en action pour sa riche contribution dans la communication non-verbale. En effet, le corps est le premier « langage » du nourrisson. Le corps assure en permanence une interaction avec l'environnement. Le mouvement qui anime un corps est porteur de significations tant pour celui qui le produit que celui qui l'observe. C'est, avant tout et surtout, un moyen d'expression qui dépasse les barrières interculturelles. C'est pour cette raison que j'ai choisi le corps comme médiation des intentions et des états mentaux dans les interactions sociales.

Ce qui déconcerte chez un enfant atteint d'autisme, c'est l'altération qualitative des relations sociales et de la communication. Alors que ces enfants sont riches en mouvement, ils sont pauvres en geste. Si le langage verbal, les expressions du visage, la direction du regard sont mal décodés, qu'en est-il du langage corporel ?

L'objectif de ce travail de thèse est de déterminer la contribution du corps en action dans la compréhension des interactions sociales. Pour ce faire, nous avons identifié les réseaux cérébraux qui sous-tendent les processus de reconnaissance d'une scène sociale illustrée par la seule cinématique du corps. Dans une perspective développementale, nous avons interrogé la capacité des enfants à extraire un contenu social à partir du corps en mouvement et nous avons mesuré les activations cérébrales associées. Nous avons ensuite exploré comment cette information minimaliste porteuse de signification sociale pouvait être utilisée dans l'autisme où la dimension sociale est altérée.

La première partie de cette thèse constitue un cadre théorique qui propose de situer l'ensemble de ce travail parmi les données de la littérature. Ce cadre théorique s'articule autour de trois grands chapitres. Le premier chapitre dresse un état de l'art sur le thème de la cognition sociale et plus précisément, sur la compréhension des interactions sociales. Nous avons retracé les étapes du développement de cette aptitude sociale avant d'en explorer les corrélats neurophysiologiques et leur état de maturation à la lumière de deux fondements théoriques. Dans le second chapitre, nous avons présenté le modèle de référence pour la perception du mouvement humain. Nous avons précisé les invariants que détecte le système visuel très tôt au cours du développement et identifié les mécanismes centraux qui sous-tendent cette compétence perceptive. Le dernier chapitre est consacré à l'autisme, pathologie du développement dont la dimension sociale est particulièrement affectée. Des données cliniques, génétiques, anatomo-fonctionnelles et théoriques introduisent ce chapitre avant de développer les particularités de la perception sociale qui caractérisent cette pathologie.

La deuxième partie de cette thèse est consacrée à la méthodologie utilisée dans nos études. Une approche comportementale nous a aidés à interroger les compétences d'extraction d'un contenu social à partir du corps en action chez des enfants de développement typique et chez des enfants atteints d'autisme. Grâce à la technique d'imagerie cérébrale fonctionnelle, nous avons identifié les mécanismes centraux sous-tendant la compréhension des interactions sociales chez l'adulte et questionné leur état de maturation chez l'enfant de développement typique.

La troisième partie de cette thèse décrit les résultats expérimentaux. Le corps expérimental de ce travail se compose de quatre études : deux études comportementales et deux études en imagerie cérébrale. Chaque étude est brièvement introduite par les questions posées et se termine par une discussion spécifique.

La quatrième partie clôturera ce travail de thèse par une discussion générale autour des grands thèmes abordés par notre expérimentation. Nous y aborderons les potentialités du mécanisme miroir dans la cognition sociale, sa mise en place au cours du développement ainsi que son implication et ses limites dans l'autisme. Dans cette dernière partie sont également intégrées diverses perspectives de recherche que suggèrent nos résultats.

CADRE THEORIQUE

I. LA COGNITION SOCIALE

L'être humain est adapté pour vivre parmi ses semblables avec lesquels il s'engage dans des interactions sociales tout au long des étapes de sa vie. Au cours de l'évolution, l'espèce humaine a développé cette capacité à traiter les informations sociales : les hommes se sont accoutumés à décoder ces informations et ont appris à y répondre d'une manière adaptée et sophistiquée.

La cognition sociale, dont la perception sociale est le premier niveau d'accès, dote l'être humain de cette formidable capacité à reconnaître et à comprendre les comportements de ses pairs afin d'interagir avec eux. L'observation de ces comportements permet notamment d'inférer et de prédire leurs états mentaux et leurs intentions. Les mécanismes qui y concourent s'appuient sur une analyse précise d'informations multisensorielles, et souvent dynamiques, telles que la parole, les mimiques faciales, le regard, la posture ou encore les gestes qui sont autant d'indices de l'état subjectif, émotionnel et intentionnel d'une personne.

Dans ce chapitre, nous tenterons de répondre aux interrogations suivantes : 1- Comment le nourrisson prend-il conscience de son corps comme moyen d'interaction avec autrui ? 2- Sur quels mécanismes cérébraux repose la compréhension des interactions sociales ? Ces mécanismes sont-ils spécifiques ? Participent-ils à l'émergence d'autres aptitudes ?

I. 1. Comment se développe la compréhension d'une interaction sociale ?

Le corps n'est pas qu'une sortie motrice efficace pour se mouvoir dans l'espace, c'est avant tout un moyen d'expression et de communication avec autrui. Le nourrisson, limité dans ses mouvements, s'évertue à découvrir son propre corps, ses relations au monde physique mais surtout, au monde social.

I. 1. 1. L'expérience du corps : connaissance de soi

Les théories classiques de psychologie de l'enfant postulaient que le nouveau-né venait au monde sans être capable de distinguer son corps de l'environnement, faisant de lui

un petit être qui « fusionnait » avec le monde (Piaget, 1936; Mahler et Mcdevitt, 1982). Or de récents travaux montrent que le nouveau-né possède une connaissance implicite de son corps (pour revues, voir, von Hofsten, 2007; Rochat, 2007). Dès la naissance, le nouveau-né manifeste une connaissance sensori-motrice de son propre corps. Cette connaissance précoce repose sur les perceptions intermodales (visuelle et proprioceptive) du corps en mouvement dont sont capables les nouveau-nés dès la naissance, et même avant. En effet, à partir du troisième mois de gestation, le fœtus bouge, entend et est sensible au plan tactile (Humphrey, 1970). Le fœtus serait donc potentiellement capable de faire l'expérience unique du corps propre sur la base de sensations combinées extéroceptives (extérieur à son corps) et intéroceptives (propre à son corps).

Percevoir le monde environnant, c'est aussi se percevoir soi-même en tant que « percevant » et « acteur » dans cet environnement. Ces deux informations sont toujours indissociables. C'est ainsi que le nourrisson développe deux sortes de connaissance de soi : une connaissance de soi en relation avec les objets physiques et une connaissance de soi en relation avec autrui (Neisser, 1991). D'ailleurs c'est en explorant à la fois son environnement physique et social que le nourrisson explore simultanément son propre corps et sa propre affectivité. En d'autres termes, comme le précise Philippe Rochat « Percevoir et agir dans l'environnement, c'est établir un rapport fonctionnel entre soi et les choses » (pour revues, voir, Rochat et Goubert, 2000; Rochat, 2007). Quand le nourrisson agit dans l'environnement par la saisie manuelle ou la capture orale d'un objet, son action l'informe sur les caractéristiques de l'objet mais aussi sur les capacités de son corps en action. Action et perception constituent donc une source de connaissance du corps, en plus d'une connaissance des choses (von Hofsten, 2007).

I. 1. 1. 1. Le corps différencié : perception visuelle et action

De nombreux exemples empiriques démontrent que le nouveau-né est précocement sensible aux données perceptives intermodales lui permettant d'appréhender son propre corps. Nous commencerons cette démonstration par l'importance de l'information visuelle dans l'acquisition d'une « conscience » de son corps en action.

Dans les années 1970, une série de travaux a montré que les informations visuelles étaient utilisées par le nouveau-né pour contrôler sa posture. Sans retracer la chronologie des

événements, nous retiendrons de ces travaux que le nouveau-né âgé de quelques jours est influencé par la perception d'un flux visuel qui peut conduire à une instabilité posturale (Jouen, 1986; Jouen et al., 2000). Une récente étude est venue conforter l'idée d'un couplage précoce entre la perception visuelle et l'action (Barbu-Roth et al., 2009). Cette étude visait à déterminer si le réflexe de marche du nouveau-né (de l'anglais, *stepping*) pouvait être induit ou facilité par l'information visuelle uniquement. En créant un flux optique similaire à celui perçu lors de la marche, les auteurs ont montré que les nouveau-nés réalisaient significativement plus de pas lorsqu'ils étaient exposés à ce flux visuel (Barbu-Roth et al., 2009). En dépit d'une vision encore immature, le nouveau-né est néanmoins capable de percevoir et d'utiliser les informations visuelles issues de son propre mouvement. Cette étude élégante confirme l'existence précoce d'un couplage entre la perception visuelle de l'environnement et les mouvements que nous réalisons.

L'information visuelle n'est pas la seule modalité qu'utilise le nouveau-né pour découvrir son environnement. Sur la base de l'information tactile, le nouveau-né de 24 heures discrimine une stimulation dont l'origine est extérieure à son corps d'une stimulation qui provient de son propre corps. Ainsi, le nouveau-né réagit¹ significativement plus au doigt de l'expérimentateur en contact avec sa joue plutôt qu'au transport spontané de sa propre main sur sa joue (Rochat et Hespos, 1997). Cette étude montre que le nouveau-né différencie l'information intermodale, c'est-à-dire le contact physique de la main d'autrui *versus* celui de sa propre main. Nous sommes donc loin de l'idée d'une confusion « soi-monde » au début de la vie, comme cela était supposé par les théories classiques (Piaget, 1936; Mahler et Mc devitt, 1982). Dès la naissance, le nouveau-né montre une capacité de discrimination lui permettant de connaître implicitement son corps, tout du moins comme entité différenciée, parmi d'autres entités différenciées de l'environnement.

I. 1. 1. 2. Le corps situé et agent dans l'environnement

Au-delà de ce corps différencié, le nourrisson est capable de se situer par rapport aux choses. Aux alentours de quatre mois, le nourrisson s'engage dans des tentatives de saisie manuelle d'objet (Piaget, 1936; Thelen et al., 1996; van der Fits et al., 1999). En dépit de difficultés et d'échecs répétés, le nourrisson renouvelle les expériences et s'exerce pour

¹ La réaction du nouveau-né était mesurée en terme de fousissement, c'est-à-dire le nombre d'orientations de la bouche vers la main.

acquérir progressivement une connaissance de son environnement. Il découvre son espace de préhension ainsi que les caractéristiques physiques des objets malgré ses compétences motrices en cours de développement. En effet, selon le degré de compétence posturale, le nourrisson tente ou non certaines activités d'exploration comme s'il « évaluait » ses compétences motrices et posturales avant de se lancer dans la réalisation de l'action. Par voie de conséquence, il prend connaissance des capacités et des limites de son corps en relation avec les indices contextuels (Rochat et al., 1999). C'est en réalisant de telles actions vers les objets que le nourrisson apprend ses propres capacités d'action sur la base d'informations visuelles, proprioceptives et posturales.

Enfin, le nourrisson développe un sens du corps comme agent dans l'environnement. Dès le deuxième mois, il commence à sourire dans des échanges réciproques avec autrui. Il devient attentif aux conséquences de ses propres actions (Rochat, 2007). Par la saisie d'objets notamment, il expérimente à nouveau son pouvoir de causalité physique sur les objets, tout autant que son impuissance vis-à-vis d'eux. Le dépassement de cette impuissance contribue à la mise en place de nouvelles stratégies sensori-motrices et posturales du nourrisson en vue d'élargir son champ d'action dans l'environnement.

Grâce à d'ingénieux protocoles expérimentaux, il a été montré que les nourrissons sont capables d'apprendre à sucer leur tétines d'une façon particulière afin d'entendre la voix de leur mère plutôt qu'une autre voix féminine ou bien de voir le visage de leur mère plutôt que qu'un autre visage féminin (pour revue, voir Rochat, 2003). Le dispositif des « tétines musicales » a permis de montrer qu'à partir de l'âge de deux mois (mais pas avant cet âge) les nourrissons apprennent à moduler leur action orale pour explorer les conséquences de cette action (Rochat et Striano, 1999). Le nourrisson manifeste un sens du corps comme agent des transformations perceptives qu'il explore systématiquement.

I. 1. 1. 3. Le corps organisé : l'apparition d'un schéma corporel

Si le nourrisson acquiert une connaissance implicite de son corps en relation avec son environnement, il découvre également son corps en tant que corps organisé. En effet, dès le deuxième mois, le nourrisson commence à manifester une exploration systématique des zones de son corps, en particulier ses mains et ses pieds. Dans une élégante étude de Rochat et Morgan (1995), les mouvements de jambes du nourrisson ont été filmés et lui ont été

présentés en simultané. Le nourrisson est observé pendant qu'il explore le mouvement de ses propres jambes sur l'écran. Ces mouvements sont présentés soit tels que le nourrisson les observerait directement, soit en les inversant spatialement (inversion droite-gauche). Dans la condition d'image inversée, l'image projetée introduit un conflit entre la perception visuelle et les informations proprioceptives produites par les jambes en mouvement. Les résultats montrent que dès trois mois, le nourrisson passe plus de temps à regarder la vidéo présentant une vue incongrue de ses jambes. En parallèle, il tend à produire davantage de mouvements de jambes comme pour explorer davantage cette nouvelle calibration visuo-perceptive du corps. Il est possible que ce comportement contribue à l'élaboration du schéma corporel, c'est-à-dire une organisation visuo-spatiale de son propre corps.

L'activité cérébrale mesurée par l'électroencéphalographie (EEG) montre que les nourrissons de trois mois ont un patron d'activation équivalent lorsqu'ils perçoivent des visages ou des corps humains. Ces patrons d'activation sont similaires à ceux enregistrés chez l'adulte. Très tôt, les nourrissons reconnaissent à la fois la configuration des visages mais aussi des corps (Gliga et Dehaene-Lambertz, 2005). Cette connaissance du schéma corporel s'affine avec l'âge puisqu'à partir de 15 / 18 mois, le nourrisson discrimine des dessins de corps humain désorganisé (les membres supérieurs à la place des membres inférieurs, des bras sur la tête, des membres détachés etc.) par rapport à des dessins réalistes de corps humain (Slaughter et al., 2002). Ces résultats laissent à penser que la construction d'un schéma corporel est en cours puisque le nourrisson commence à repérer la position des membres qui composent le corps (Slaughter et al., 2002).

La lecture de ces travaux tend à démontrer que le nourrisson a très tôt une connaissance implicite de son corps. Bien évidemment cette connaissance va de pair avec une connaissance émotionnelle et affective, marquée par l'apparition des sourires sociaux. La compréhension qu'a le nourrisson de son influence sur l'environnement, qu'il soit physique et social, lui procure un intense plaisir qui agit probablement comme un renforcement positif et qui contribue à accroître davantage sa fascinante curiosité pour autrui.

I. 1. 2. L'exploration et le partage

A partir du second mois lorsque le nourrisson se met à sourire non plus de façon involontaire mais dans le contexte de conversations affectives avec autrui, il développe des attentes précises (Striano et Reid, 2006). Par une action déjà sociale telle que sourire, le nourrisson devient agent de communication avec les autres.

Les protoconversations qui se produisent dans les longs face-à-face avec l'adulte sont certainement la source d'une connaissance implicite du corps comme siège d'interaction sociale. Dans cette relation dyadique, les adultes tentent souvent de produire chez le nourrisson un état affectif positif qui entretient cet échange social. Lors de ces échanges, l'adulte se met en « résonance » sociale avec le nourrisson et lui offre littéralement un « miroir social ».

Au grès de ses progrès sensori-moteurs avec notamment l'acquisition de la station assise puis de la marche autonome, le nourrisson élargit son champ d'action et multiplie sa palette d'échanges avec son environnement et ses pairs. Les nourrissons âgés de six mois présentent une activité cérébrale proche de celle des adultes lorsqu'ils observent une action dirigée vers un but par rapport à un mouvement simple (Nystrom, 2008b). Cette activité cérébrale est par ailleurs caractéristique de l'activité du mécanisme miroir, réseau fronto-pariétal activé par l'observation et la compréhension d'une action intentionnelle (Rizzolatti et Craighero, 2004).

Aux alentours du huitième mois, le nourrisson se saisit encore plus des informations visuelles et dynamiques qui l'entourent pour appréhender son environnement social. Il est en effet capable de discriminer, sur la base d'informations visuelles sélectives du mouvement, le visage de sa mère d'un visage non familial (Layton et Rochat, 2007). A neuf mois, il commence à manifester une attention partagée (ou attention conjointe) avec autrui alors qu'il explore les objets et les événements dans l'environnement. Il montre du doigt les choses en s'assurant que l'autre est attentif à l'objet indiqué et commence à explorer la réaction d'autrui en référence à un événement perçu : la relation triadique apparaît (Tomasello et al., 2007). Des études ont montré que l'attention conjointe, initiée par la direction du regard d'un adulte vers un objet, s'accompagne d'une activation accrue des régions cérébrales sollicitées dans les processus attentionnels (Striano et al., 2006; Hoehl et al., 2008). En effet, lors du contact oculaire, l'attention du nourrisson est dirigée vers de nouvelles informations sociales.

L'attention conjointe, en mobilisant des ressources attentionnelles, semble permettre le développement d'autres compétences cognitives et notamment le langage.

I. 1. 3. La « co-conscience » de soi et des autres

Cette période du développement où le nourrisson développe une conscience de soi de concert avec celle qu'il a d'autrui est définie comme la « co-conscience » (Rochat, 2004). En effet, à 14 mois, le nourrisson interprète le comportement des adultes, spécifiquement leurs gestes, comme porteurs de sens (et d'intention) pour eux (Behne et al., 2005). A cet âge, le nourrisson distingue une action intentionnelle d'une action accidentelle réalisée par un adulte (Behne et al., 2005).

Cette prise de conscience des actions d'autrui permet au nourrisson d'évaluer ses rapports avec les autres. Afin de réussir une épreuve, le nourrisson de cet âge commence à demander de l'aide à l'adulte en utilisant le pointage, en particulier, pour désigner la source d'intérêt. Il sollicite l'adulte en comprenant les limites de ses propres capacités face à la difficulté qu'il rencontre (Goubet et al., 2006). Par ailleurs, entre 14 et 18 mois, le nourrisson devient sélectif lorsqu'il a le choix de l'individu qui est susceptible de l'aider. Par exemple, il aura tendance à « formuler » davantage sa requête d'aide envers un individu qui se montre socialement plus avenant ou qui a montré au préalable ses capacités pour résoudre le problème (Goubet et al., 2006). Ces résultats vont dans le sens d'une connaissance de l'expérience partagée entre le nourrisson et l'adulte, c'est-à-dire d'une co-conscience.

A partir de 18 mois, le jeune enfant interprète un geste de pointage dirigé vers un objet en fonction de l'expérience qu'il a auparavant partagé avec un adulte. Par exemple, le jeune enfant réalise un jeu de puzzle avec un premier adulte puis une activité de rangement avec un second adulte, si un des deux adultes pointe un objet alors le jeune enfant comprend l'intention de l'adulte en fonction de l'activité dans laquelle ils se sont précédemment engagés (Liebal et al., 2009). Les enfants de 18 mois sont capables d'utiliser l'expérience partagée non seulement pour identifier l'objet d'intérêt mais aussi pour comprendre l'intention derrière le geste de pointage de l'adulte. Par conséquent, le jeune enfant avant même d'avoir acquis le langage sait interpréter des gestes à visée de communication (Liebal et al., 2009).

Il est intéressant de noter que l'ordre du développement social et cognitif chez le jeune enfant reste invariant d'une culture à l'autre. Il existerait par conséquent un ordre

« universel » dans le développement de la conscience de soi et des autres au début de la vie (Callaghan et al., 2005). Cette constance dans le développement de l'enfant est peut-être un héritage phylogénétique de notre espèce.

I. 1. 4. L'imitation au service des interactions sociales

Dès la naissance, le nouveau-né imite les expressions oro-faciales des adultes (Meltzoff et Moore, 1977). Même s'il ne peut pas se voir en train d'imiter, le nouveau-né peut néanmoins en faire l'expérience proprioceptive. Les systèmes cérébraux seraient donc « câblés » génétiquement pour permettre le couplage de la perception et de l'action, à la base de cette imitation « automatique ». C'est sur la base de représentations sensori-motrices que l'imitation se construit et permet ainsi aux nourrissons d'acquérir des gestes sociaux. L'imitation précoce peut être considérée comme un processus précurseur essentiel et probablement indispensable pour comprendre autrui. L'imitation des mouvements du corps, des vocalisations et des actions dirigées vers un but procure donc un moyen de découvrir les autres personnes.

Par le jeu de l'imitation, expérience « en miroir » avec l'autre, le nourrisson apprend que ses propres actions sont associées à des états mentaux. Lorsque ces régularités sont détectées, le nourrisson dispose d'un fondement représentationnel pour réaliser des inférences sur les états mentaux d'autrui lorsqu'il perçoit une autre personne agir de la même façon. Cette représentation d'autrui permet au nourrisson d'imiter de façon adaptée. En effet, les nourrissons de 14 mois ne reproduisent pas la même action que l'adulte si elle paraît inappropriée à la situation : par exemple utiliser la tête pour appuyer sur un interrupteur alors que les mains sont libres (Gergely et al., 2002).

Si les nourrissons et jeunes enfants sont d'excellents imitateurs, c'est peut-être aussi en raison de leur immaturité neurodéveloppementale. En effet, le cortex préfrontal, dont une des fonctions centrales est l'inhibition, est immature à la naissance. Cette immaturité provient des processus de myélinisation² qui sont en pleine expansion durant les premières années de vie de l'enfant et qui sont indispensables au développement cérébral (Klingberg et al., 1999). Par conséquent, au début de la vie, le défaut d'inhibition résultant de cette immaturité

² La substance blanche ou gaine de myéline recouvre les axones des neurones et permet la transmission rapide de l'influx nerveux d'un neurone à l'autre.

cérébrale, pourrait conférer un avantage développemental notamment par les processus d'imitation. Le nourrisson imiterait l'autre de façon « excessive ». Puis, au cours du développement et de la maturité cérébrale, les mécanismes inhibiteurs deviennent opérants : le nourrisson apprend à bloquer des stratégies cognitives qui entrent en compétition et qui s'avèrent inadéquates dans certaines situations (Houde et Guichart, 2000; Moutier et al., 2006).

😊 En quelques lignes...

L'émergence d'une connaissance de soi n'est pas spontanée, elle résulte d'une expérience perceptive du corps dès la naissance. Très tôt au cours du développement, les expériences perceptives et proprioceptives permettent la construction de représentations sensori-motrices. Cette expérience du corps s'élabore en interaction avec les choses physiques mais plus encore, en interaction avec autrui. A la fin de la première année, le nourrisson manifeste son intérêt pour les objets en utilisant les gestes dans le but d'attirer l'attention de l'adulte. Sur la base des représentations sensori-motrices, l'imitation se nourrit et permet au nourrisson d'acquérir des gestes sociaux. Lors de ces échanges « en miroir » avec l'autre, le nourrisson apprend que ses propres actions ainsi que celles qu'il observe sont associées à des intentions et à des états mentaux.

I. 2. Mécanismes sous-jacents à la compréhension d'une interaction sociale

L'être humain est animé par un but qui le conduit à agir de façon intentionnelle de concert avec la nature de son état mental. Pour l'observateur extérieur, il s'agit de comprendre l'intention de l'action de l'autre pour accéder à son état mental. Ainsi la première étape pour comprendre le comportement d'autrui, c'est d'abord l'observation de celui-ci en action. Dans le contexte des interactions sociales, l'observateur extérieur à la scène doit comprendre l'intention d'un individu et la réaction du second individu. Cette section a pour objectif d'identifier les corrélats neurophysiologiques responsables de la compréhension d'une interaction sociale observée.

I. 2. 1. Observation d'une action intentionnelle

I. 2. 1. 1. Définition d'une action intentionnelle

Issu du latin *intentio* ou « action de tendre », le terme « intention » se définit comme le « mouvement de la volonté tendant à quelque fin » (Dictionnaire de l'Académie Française, 9^e édition). Il s'agit d'un acte de la volonté par lequel on détermine le but d'une action, le motif qui fait agir. Une action est dite « intentionnelle » quand elle est dirigée vers un but. L'intentionnalité recouvre le pouvoir de représenter mentalement des états de fait tels que la croyance, le désir, l'espoir, la déception etc. L'intentionnalité est considérée comme une propriété intrinsèque des états mentaux. C'est à partir de cette définition que nous aborderons la problématique des états mentaux et de l'intention.

I. 2. 1. 2. Le sillon temporal supérieur

Les travaux qui ont exploré les corrélats neurophysiologiques de l'observation d'une action ont initialement porté sur le primate. A l'aide des méthodes utilisées en neurophysiologie, il est possible d'enregistrer l'activité de populations de neurones ou de cellules individuelles en réponse à la perception visuelle de mouvements réalisés par d'autres primates. Ces enregistrements ont permis de mettre en évidence une activité neuronale spécifique de l'analyse visuelle du mouvement du corps dans la région polysensorielle du sillon temporal supérieur (STS) (Perret et al., 1985). Ces neurones répondent également à la présentation statique d'un corps qui paraît en mouvement (implicite), ce qui souligne que le STS est sensible à la perception d'une action (Jellema et Perrett, 2003). Par ailleurs, des populations de neurones du STS répondent sélectivement aux visages et à la posture du corps (Oram et Perret, 1996), mais aussi à la direction du regard (Jellema et al., 2000). De plus, l'activité de ces neurones, sensibles à la direction des parties du corps, est modulée par l'attention de l'individu qui réalise une action. La région du STS permettrait ainsi l'analyse visuelle d'une action intentionnelle (Jellema et al., 2000).

L'imagerie cérébrale fonctionnelle a permis de confirmer chez l'homme le rôle du STS postérieur dans l'observation du mouvement humain (Bonda et al., 1996 ; Grossman et al., 2000) . La présentation d'actions réalistes et dynamiques effectuées par un acteur sollicite également le STS postérieur (Saxe et al., 2004). L'activation du STS est spécifique non seulement du mouvement humain mais surtout de la relation entre le mouvement observé et le

contexte dans lequel il se produit. En effet, le STS est activé au cours de la présentation visuelle d'une action, mais aussi lorsque la partie finale de l'action est cachée et ne peut donc être vue dans son intégralité (Saxe et al., 2004) . Cette région jouerait donc un rôle dans la prédiction et l'anticipation du but de l'action perçue.

Par voie de conséquence, le STS apparaît comme une région clef dans la représentation d'une action intentionnelle (Saxe et al., 2004). Cette idée est confirmée par les études qui ont exploré la modalité auditive, puisque le fait de présenter le son d'une action entraîne également le recrutement du STS postérieur que ce soit chez le singe ou chez l'homme (Bidet-Caulet et al., 2005; Barraclough et al., 2005). Ces travaux confèrent au STS un rôle dans l'intégration multisensorielle dans la reconnaissance d'une action. A la lecture de ces travaux, le STS est une région d'intégration sensorielle qui tient un rôle particulier dans l'analyse visuelle des actions intentionnelles.

I. 2. 2. Attribution des états mentaux

I. 2. 2. 1. Définition de la théorie de l'esprit

La théorie de l'esprit ou mentalisation désigne la capacité de « lire » (de l'anglais *mindreading*) dans son propre esprit³ ainsi que dans celui d'autrui. Elle fait référence à deux concepts : la connaissance du fait qu'autrui puisse avoir un état mental différent de soi et la capacité d'inférer un état mental à autrui. Se représenter les états mentaux d'autrui permet de comprendre et de prédire leurs comportements. Cependant il n'existe pas de moyen objectif de vérifier le contenu de « l'esprit » d'un individu ou d'évaluer ses motivations et ses désirs. Par conséquent, quand on interagit avec autrui, on ne peut qu'essayer de « deviner » ses états mentaux en utilisant notre théorie de l'esprit pour saisir ce qu'il pense, ce qu'il veut ou ce qu'il ressent.

La théorie de l'esprit a été introduite par Premack et Woodruff en 1978 lors d'une étude comportementale qui visait à tester si les grands singes étaient capables de lire les pensées d'autrui (Premack et Woodruff, 1978). Les auteurs ont déduit de cette étude que les grands singes avaient la capacité de comprendre et prédire les pensées d'un congénère. Cette

³ Dans le cadre de ce travail de thèse, nous nous limiterons à la compréhension des états mentaux d'autrui.

interprétation a cependant été remise en question et reste actuellement sujet à controverse (Kaminski et al., 2008; pour revue, voir Call et Tomasello, 2008).

I. 2. 2. 2. Deux courants théoriques

➤ La théorie « théorique » : « Inférer pour déduire »

Les partisans de cette conception partent du postulat que les individus ont des théories, d'où le nom « *theory-theory* » en anglais. Le développement cognitif de l'individu s'organiserait à partir de l'expérience. L'acquisition de la théorie de l'esprit se ferait par l'intermédiaire d'un apprentissage heuristique de type essai / erreur. Les individus, à partir d'une théorie naïve reposant sur des lois, des concepts implicites et des règles d'inférences, pourraient interpréter les informations qu'ils reçoivent à partir des comportements d'autrui et faire des prédictions sur les événements futurs (Wellman et Bartsch, 1988; Bartsch et Wellman, 1989). La confrontation de leurs interprétations et de leurs prédictions à la réalité, permettrait ensuite de modifier la théorie, si nécessaire, pour l'améliorer.

➤ La théorie de la simulation : « Entrer en résonance »

La théorie de la simulation, proposée dans les années 80, postule que la capacité à comprendre les autres individus repose sur un processus de simulation mentale (Gordon, 1986; Goldman, 1993). Cette théorie suppose que la capacité d'attribuer des croyances est affaire de procédure (« savoir comment ») plutôt que de théorie (« savoir que »). Les pensées d'un individu seraient inférées en faisant comme si on était à sa place dans la situation qu'il rencontre et en imaginant alors comment on raisonnerait et réagirait si on était effectivement dans cette situation.

I. 2. 2. 3. Le réseau de la mentalisation

L'expression « cerveau social » (Figure 1) a été inventée pour définir l'ensemble des corrélats neurophysiologiques qui sous-tendent la cognition sociale (Brothers, 1990). Pourtant, c'est la faculté de « lire » dans les pensées d'autrui qui tient le premier rôle dans les investigations concernant la cognition sociale.

Pour identifier les mécanismes à l'origine de cette aptitude, les études utilisent des protocoles expérimentaux visant à recréer des situations dans lesquelles les sujets sont amenés à « mentaliser » : en lisant des histoires (Baron-Cohen et al., 1994; Fletcher et al., 1995; Vogeley et al., 2001) ou en regardant des bandes-dessinées (Gallagher et al., 2000; Brunet et al., 2000). Ces protocoles font souvent appel à des pré-requis linguistiques rendant ainsi l'interprétation des régions cérébrales sollicitées difficile. La contribution du langage aux processus de mentalisation est objet de débat (pour revue, voir de Villiers, 2007). Pour certains auteurs, le langage est nécessaire à l'acquisition de la mentalisation (Siegal et Varley, 2006), pour d'autres le langage n'est pas un pré-requis puisque des enfants avec des troubles du langage ont des capacités normales d'attribution d'états mentaux (Perner et al., 1987).

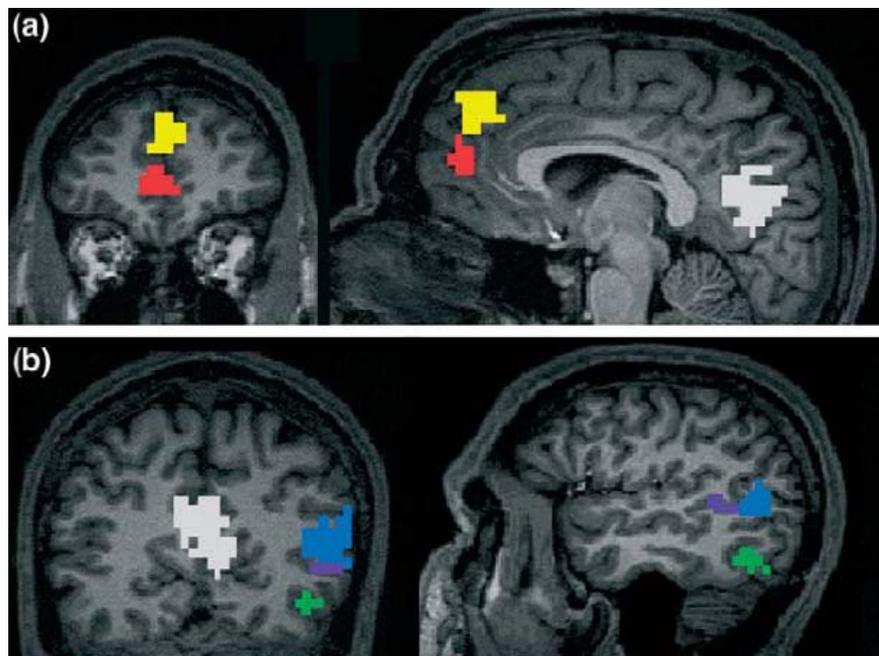


Figure 1 : Régions du « cerveau social » selon la définition de Saxe (Saxe, 2006). (a) Régions médianes. (b) Régions latérales. En bleu : jonction temporo-pariétale droite, en violet : région postérieure du sillon temporal supérieur droit, en vert : région extrastriée droite, en rouge : cortex préfrontal médian ventral, en jaune : cortex préfrontal médian dorsal et en blanc : région cingulaire antérieure.

D'autres protocoles utilisent des supports plus dynamiques et symboliques. Les sujets observent par exemple des formes géométriques en mouvement pendant que l'activité cérébrale est enregistrée en imagerie fonctionnelle (Castelli et al., 2000). Dans ce dispositif minimaliste, seule l'information de mouvement amène les sujets à attribuer des intentions aux formes géométriques. Les activations cérébrales sollicitées dans l'attribution d'intention

apparaissent dans le cortex préfrontal médian, le pôle temporal, le STS au niveau de la jonction temporo-pariétale et le cortex visuel extrastrié (Castelli et al., 2000).

Cette étude n'est qu'un exemple parmi tant d'autres pour mentionner que le processus de mentalisation repose sur des régions spécifiques telles que le cortex préfrontal médian, le STS postérieur et la jonction temporo-pariétale que les protocoles reposent ou non sur des pré-requis langagiers (pour revues, voir Gallagher et Frith, 2003 ; Saxe 2006 ; Frith, 2007 ; Adolphs, 2009).

De part sa nature multisensorielle, nous avons décrit précédemment le STS isolément des réseaux qui sous-tendent l'attribution des états mentaux et des intentions. Nous tenons à souligner ainsi son rôle dans l'intégration polymodale, notamment visuelle, qui constitue le point de départ des mécanismes impliqués dans la compréhension d'une interaction sociale.

Le cortex préfrontal médian dans sa composante ventrale serait activé lorsqu'on évalue l'état mental d'un individu relativement similaire à soi alors que la composante dorsale aurait attiré au jugement d'une personne différente de soi (Mitchell et al., 2006). Cette dichotomie du cortex préfrontal médian reflèterait des aspects différents de la mentalisation (pour revue, voir Amodio et Frith, 2006). La partie ventrale serait dévolue aux informations émotionnelles de soi et d'autrui tandis que la partie dorsale concernerait davantage les relations triadiques (pour revues, voir Amodio et Frith, 2006; Saxe, 2006). Quant à la jonction temporo-pariétale, elle joue un rôle dans la prise de perspective qu'elle soit visuelle c'est-à-dire se représenter la position d'un corps dans l'espace (Blanke et al., 2005) ou cognitive c'est-à-dire « voir » le monde selon le point de vue de quelqu'un d'autre (Saxe et Kanwisher, 2003). Par ailleurs, cette région serait d'autant plus sollicitée si la demande attentionnelle est nécessaire (Mitchell, 2008).

I. 2. 2. 4. Développement du réseau de la mentalisation

Si la période d'acquisition de la théorie de l'esprit a d'abord été définie autour de l'âge de quatre ans⁴ (Wimmer et Perner, 1983; Perner et al., 1987), il semblerait qu'une mentalisation implicite serait opérationnelle avant l'âge de deux ans chez des enfants de développement typique. L'utilisation d'épreuves non-verbales et de l'oculométrie ont permis de mettre en évidence que des enfants dès 15 mois sont capables de prédire dans des

⁴ La performance des enfants était basée sur des épreuves verbales de fausse croyance.

situations précises le comportement d'une personne sur la base des fausses croyances (Onishi et Baillargeon, 2005; Southgate et al., 2007). Sur quels substrats neuronaux repose cette capacité sociale au cours du développement ? La question de la maturation des circuits cérébraux impliqués dans l'attribution d'intention a été abordée en imagerie fonctionnelle.

Une épreuve d'attribution d'intention a été proposée à des enfants âgés de huit à 12 ans. Les enfants présentent une activité cérébrale similaire à celle des adultes (Kobayashi et al., 2007). Les auteurs ont par ailleurs évalué le rôle que pouvait jouer la modalité de présentation sur les régions impliquées (Kobayashi et al., 2007). L'épreuve a par conséquent été proposée dans une version verbale (l'histoire est racontée) et non-verbale (présentation de dessins). Quel que soit le mode de présentation, le réseau de la mentalisation est identique chez l'enfant et l'adulte, néanmoins les enfants présentent une activité supérieure à celle des adultes au niveau du STS et du cortex préfrontal ventro-médian. Cette activité cérébrale pourrait être augmentée en raison d'un effort cognitif plus important chez les enfants (Kobayashi et al., 2007).

Une autre étude a confirmé que des enfants plus âgés (entre neuf et 16 ans) présentaient une activation du réseau de la mentalisation équivalente à celle de l'adulte. La région ventrale du cortex préfrontal médian est une nouvelle fois mise en évidence chez les enfants alors que la région dorsale est plus activée chez les adultes (Moriguchi et al., 2007).

Les adolescents présentent une activité cérébrale équivalente à celle des adultes avec un recrutement du cortex préfrontal médian, du STS, du pôle temporal et du précuneus (Blakemore et al., 2007). Bien que la nature du réseau de la mentalisation reste identique à celui de l'adulte, le patron d'activations cérébrales serait plus sollicité au niveau préfrontal dorsal à l'adolescence (Blakemore et al., 2007).

Ces études soulignent l'existence d'une trajectoire développementale concernant l'attribution d'intention. L'implication du cortex préfrontal semble se spécifier au cours du développement puisque cette région est davantage sollicitée dans sa partie ventrale chez l'enfant (Moriguchi et al., 2007; Kobayashi et al., 2007) puis dans sa partie dorsale à partir de l'adolescence (Blakemore et al., 2007). Ces résultats sont à rapprocher de la distinction fonctionnelle du cortex préfrontal qui a été observée chez l'adulte (Mitchell et al., 2006).

Dans une épreuve de jugement d'opinion, la partie ventrale du cortex préfrontal est activée lorsque l'individu observé a des opinions similaires à soi alors que la partie dorsale est activée lorsque l'individu observé est jugé comme étant différent de soi (Mitchell et al.,

2006). Ces données laissent à penser que l'enfant pourrait s'identifier plus souvent à l'individu alors que l'adolescent prend plus de distance par rapport à l'individu qu'il observe.

L'ensemble des données converge vers l'idée que le réseau de la mentalisation est mature dès huit ans (Blakemore et al., 2007; Moriguchi et al., 2007; Kobayashi et al., 2007). Néanmoins ces données ne permettent pas de déterminer la période développementale à laquelle le réseau est opérationnel. Des études chez des enfants plus jeunes sont encore difficiles à réaliser en raison des contraintes liées à la technique d'imagerie cérébrale fonctionnelle (pour plus de détails, voir partie Matériels et Méthodes). Cependant, il existe un profil fonctionnel du cortex préfrontal caractéristique de la période de l'enfance / adolescence dans des épreuves d'attribution d'états mentaux (pour revue, voir Sebastian et al., 2008). Le profil d'activation de la région frontale diffère au cours de l'enfance (Moriguchi et al., 2007), cette région est plus activée durant l'adolescence qu'à l'âge adulte (Blakemore et al., 2007).

Ces données sont à mettre en relation avec les données neuro-anatomiques sur la maturité tardive de certaines régions, en particulier frontales et temporales (Singer, 2006; pour revues, voir Lenroot et Giedd, 2006; Shaw et al., 2008). En effet, la trajectoire développementale de la substance grise, constituant le corps des neurones, dépend des régions cérébrales (Casey et al., 2005; Lenroot et Giedd, 2006). Cette donnée est importante puisqu'elle signe le fait que des réorganisations synaptiques dans le lobe frontal se poursuivent à la puberté. Le cortex sensorimoteur primaire atteint une maturité à des stades précoces du développement contrairement au cortex préfrontal dévolu à des fonctions « plus intégrées » (pour revue, voir Singer, 2006). Au sein du lobe temporal par exemple, la région la plus tardive à atteindre la maturité est le STS qui se trouve être la région d'intégration polysensorielle par excellence.

Par conséquent, les différences d'activité cérébrale observées au cours du développement pendant des épreuves d'attribution d'intentions sont cohérentes avec les processus maturationnels spécifiques de cette période.

😊 En quelques lignes...

Observer les actions réalisées par nos pairs permet de comprendre les intentions et les états mentaux d'autrui. La théorie de l'esprit ou mentalisation désigne l'aptitude cognitive à « lire » dans les pensées d'autrui. Pour expliquer cette aptitude cognitive, deux fondements théoriques s'opposent. Selon la théorie théorique, les individus s'appuient sur des lois, des concepts implicites et des règles d'inférences. Selon la théorie de la simulation, ils procèdent à une simulation mentale pour se mettre à la place d'autrui. C'est en utilisant une théorie de l'esprit que l'être humain comprend et prédit les comportements d'autrui.

Le cerveau social définit les régions cérébrales dévolues aux traitements des informations sociales. Concernant l'attribution d'états mentaux, le réseau de la mentalisation inclut principalement le cortex préfrontal médian et la jonction temporo-pariétale. Les études en neuroimagerie fonctionnelle montrent que le réseau de la mentalisation est mature dès l'âge de huit ans. Il existe néanmoins des différences d'activation notamment dans la région préfrontale qui corroborent avec les données neuro-anatomiques et les processus maturationnels décrits au cours du développement.

I. 2. 3. Le mécanisme miroir

I. 2. 3. 1. La découverte des neurones miroirs chez le singe

Au début des années 1990, l'équipe italienne de Giacomo Rizzolatti a découvert dans le cerveau des singes macaques une classe de neurones pré-moteurs (situés dans la région F5) qui déchargent non seulement quand le singe exécute des actions de la main tendant vers un but, comme attraper des objets, mais aussi quand il observe d'autres individus (singes ou humains) exécutant des actions similaires (di Pellegrino et al., 1992; Gallese et al., 1996). Des neurones avec des propriétés similaires ont ensuite été découverts dans un secteur du cortex pariétal postérieur connecté réciproquement à l'aire F5.

L'observation d'une action de la main en relation avec un objet mène à une activation du même réseau neuronal actif durant son exécution réelle. Ces neurones ont été appelés « neurones miroirs ». Les neurones miroirs F5 sont également activés quand la phase critique finale de l'action observée, c'est-à-dire que l'interaction de la main et de l'objet, est cachée (Umiltà et al., 2001). Une classe particulière de neurones miroirs F5, « les neurones miroirs

audio-visuels » peuvent être déclenchés non seulement par l'exécution et l'observation de l'action, mais aussi par le son produit par cette même action (Kohler et al., 2002).

De plus, une population de neurones miroirs rattachée à l'exécution et à l'observation des mouvements non pas de la main mais de la bouche a été décrite (Ferrari et al., 2003). La majorité de ces neurones décharge quand le singe exécute et observe des actions de transit ou d'ingestion en rapport avec des objets telles que saisir, mordre ou lécher. Par ailleurs, un petit pourcentage de neurones miroirs relatifs à la bouche décharge durant l'observation d'actions faciales communicatives et non transitives (non dirigées vers un objet) exécutées par l'expérimentateur en face du singe : ces neurones ont été nommés « les neurones miroirs communicatifs » (Ferrari et al., 2003).

Par conséquent, cette activité « miroir » coderait le but voire l'intention portée par l'action quelle que soit la modalité sensorielle ou l'effecteur mis en jeu (pour revue, voir Rizzolatti et Craighero, 2004). L'observation d'une action évoque une activité cérébrale similaire à celle générée lorsque le singe exécute lui-même cette action. La possibilité pour le système nerveux de se représenter une action en l'absence de contingence motrice a ouvert des horizons prometteurs. Ces résultats ont fourni les premiers arguments neurophysiologiques en faveur de la théorie de la simulation, initialement basée sur des concepts philosophiques.

I. 2. 3. 2. Les caractéristiques du mécanisme miroir chez l'homme

L'existence d'un mécanisme miroir couplant la perception et l'exécution de l'action a été mise en évidence dans le cerveau humain grâce aux techniques d'imagerie cérébrale fonctionnelle (Rizzolatti et al., 1996; Hari et al., 1998; Cochin et al., 1998; Cochin et al., 1999). Durant l'observation de l'action, il y a une forte activation du cortex pré-moteur, frontal inférieur⁵ et pariétal, probablement l'équivalent humain des aires dans lesquelles les neurones miroirs ont été originellement décrits chez le singe. Ces arguments neurophysiologiques sont en faveur de l'hypothèse selon laquelle des représentations de l'action joueraient un rôle essentiel non seulement dans l'organisation de nos comportements moteurs et de leurs réalisations, mais pourraient aussi intervenir dans la perception et la

⁵ Alors que chez le singe, le cortex prémoteur ventral est défini par la région F5, son analogue chez l'être humain s'étendrait au cortex frontal inférieur dit « aire de Broca » (Aires de Brodmann 44 / 45) (Rizzolatti et Arbib, 1998; Buccino et al., 2001; Binkofski et Buccino, 2004)

compréhension des comportements moteurs d'autrui. Cette correspondance entre percevoir et agir est décrite sous le terme de phénomène de résonance motrice ou simulation motrice (Rizzolatti et Arbib, 1998; Jeannerod, 2001).

Cette résonance motrice est organisée de façon somatotopique, c'est-à-dire qu'elle respecte les différents territoires corporels représentés au sein du cortex prémoteur (Buccino et al., 2001). Par exemple, la perception d'un geste réalisé avec la main est associée à l'activation d'une zone corticale représentant la main tandis que la perception d'un mouvement de bouche est associée à une région corticale représentant la bouche. Ces résultats renforcent l'idée que l'observation d'une action sollicite les régions recrutées spécifiquement pour réaliser cette action en « activant » le programme moteur qui y participe. L'observateur activerait ainsi son propre système moteur afin de se représenter le geste d'autrui.

Néanmoins le couplage entre la perception et la réalisation d'une action serait limité à certaines « règles ». Dans un premier temps, le couplage de la perception et de l'action serait « sensible » à l'agent qui réalise l'action observée. Une étude d'imagerie cérébrale, dans laquelle des participants observaient des actions de communication de la bouche exécutées par des humains, des singes et des chiens, a montré que cette observation provoquait une activation de foyers corticaux différents selon les différentes espèces observées (Buccino et al., 2004). Ainsi lorsque le participant observe un être humain en train de communiquer sans qu'il n'entende le son de sa voix, l'activation de la partie operculaire du gyrus frontal inférieur gauche qui est un secteur de la région de Broca est observée. L'observation du claquement de lèvres du singe active bilatéralement une partie plus petite de la même région. Enfin, l'observation de l'abolement du chien (sans le son associé) active seulement les aires visuelles extrastriées. Ainsi les actions appartenant au répertoire moteur de l'observateur (comme mordre et lire un discours) ou s'y rapprochant (le claquement de lèvres du singe) sont répertoriées dans le système moteur de l'observateur. Les actions qui n'appartiennent pas à ce répertoire (comme l'abolement) seraient répertoriées et catégorisées uniquement sur la base de leurs propriétés visuelles (Buccino et al., 2004).

Le mouvement perçu doit répondre aux exigences de la biomécanique (faisabilité du mouvement) imposées entre autres par notre squelette et nos articulations. Le mouvement apparent est une technique qui consiste à présenter successivement deux photographies de posture humaine. Il a été montré qu'en variant le temps de présentation entre deux

photographies, les sujets ne perçoivent pas le mouvement de la même manière (Shiffrar et Freyd, 1990). L'épreuve consiste en la présentation d'une photographie illustrant une personne dont l'avant-bras droit est allongé sur son avant-bras gauche. La seconde photographie représente ensuite l'avant-bras gauche posé sous l'avant-bras droit. En fonction de l'intervalle de temps entre les photographies, les sujets rapportent qu'ils voient des trajectoires conformes aux limitations du corps humain qui respectent donc les contraintes biomécaniques (l'avant-bras fait le tour de l'avant-bras droit) ou au contraire des trajectoires courtes c'est-à-dire des mouvements biomécaniquement impossibles (l'avant-bras gauche « traverse » l'avant-bras droit). Les régions cérébrales impliquées dans le traitement du mouvement apparent « possible » ou « impossible » ont été explorées par imagerie cérébrale (Stevens et al., 2000). Ces travaux montrent que seule la perception des mouvements « possibles » est associée à des activations fronto-pariétales.

Par ailleurs, le couplage entre la perception et la réalisation d'une action est contraint par les compétences et les capacités motrices de l'observateur. En effet, une personne ne possède pas les mêmes aptitudes motrices qu'une autre et ce, en fonction de l'expérience motrice acquise. Par exemple, les danseurs professionnels présentent un répertoire moteur différent de celui d'une personne n'exerçant aucune activité physique particulière. Le système moteur est par conséquent plus ou moins fortement engagé en fonction des programmes moteurs individuels. L'expertise motrice de danseurs classiques ou de capoeira (art martial brésilien) a été mise à l'épreuve dans une étude en imagerie cérébrale (Calvo-Merino et al., 2005). Cette étude visait à explorer les réseaux centraux sollicités lorsque le danseur classique observait des scènes de capoeira et *vice versa*. Comme attendu, les réseaux fronto-pariétaux ainsi que le STS sont supérieurement recrutés lorsque l'action perçue fait partie du répertoire moteur du sujet (Calvo-Merino et al., 2005). Ces données expérimentales laissent à penser que l'observateur entre en résonance ou « simule » les mouvements perçus grâce à une représentation de l'action.

Pourtant limité dans son répertoire moteur, le nourrisson à partir de six mois présente une activité fronto-pariétale lorsqu'il observe des actions dirigées vers un but (Nystrom, 2008b). A partir de 12 mois (et pas avant cet âge), le nourrisson prédit « visuellement » et « activement » le but d'une action réalisée par une personne puisqu'il oriente son regard sur la fin de l'action avant qu'elle n'ait lieu (Falck-Ytter et al., 2006). Entre deux et huit ans, les enfants présentent une réactivité corticale fronto-pariétale dans l'hémisphère gauche, dans une

région correspondant au mécanisme miroir analogue à celles des adultes, spécifique de l'observation de mouvements humains en vidéo (Cochin et al., 2001; Martineau et Cochin, 2003; Martineau et al., 2008). Par conséquent, très tôt au cours du développement, le nourrisson semble solliciter des représentations de l'action qui lui permettent de comprendre une action intentionnelle.

I. 2. 3. 3. Le « mécanisme miroir »

Par le mécanisme miroir, la théorie de la simulation prend corps mais jusqu'à quel point ? La cognition motrice basée sur le couplage de la perception et de l'action serait-elle restreinte aux mouvements simples dirigés vers un but ou s'agit-il d'un mécanisme impliqué dans le traitement de l'intentionnalité d'une action ? Des auteurs ont en effet suggéré que ce mécanisme miroir pourrait jouer un rôle dans notre capacité d'inférer des états mentaux à autrui (Gallese et Goldman, 1998). Le mécanisme miroir pourrait être le processus précurseur permettant la reconnaissance de l'intention d'une action. Les êtres humains épouseraient ainsi la perspective d'autrui aussi par résonance motrice afin d'avoir accès aux états mentaux de leurs pairs.

► Attribution de l'intention dans l'action

Afin d'apporter une contribution expérimentale à cette hypothèse, deux études ont élégamment répondu à cette problématique que l'on pourrait généraliser par la question : « Comment je sais pourquoi tu fais ce que tu fais ? ». Différentes scènes en vidéo ont été proposées aux sujets : un contexte avec des objets, une action effectuée par une main qui saisit une tasse et une scène où le sujet peut supposer l'intention grâce aux indices contextuels. L'activation des cortex prémoteur ventral et frontal inférieur est plus importante dans une scène où le contexte laisse présager l'intention de l'action en cours (Iacoboni et al., 2005) . Ces résultats montrent donc qu'au-delà de la compréhension du but de l'action, le mécanisme miroir joue un rôle dans la compréhension des intentions qui mènent à une action.

Récemment, une autre étude a confirmé l'implication du mécanisme miroir dans l'accès à l'intentionnalité d'une action (de Lange et al., 2008). Dans une situation dite « ordinaire », une personne saisit une tasse (acte moteur) pour la porter à la bouche (but) afin de boire (intention). Dans la situation dite « mouvement inapproprié », la personne tient la tasse de façon inhabituelle pour réaliser la même action. Dans la situation dite « intention

inappropriée », la personne porte la tasse non pas à la bouche mais à l'oreille. Ainsi en manipulant soit le mouvement sollicité pour réaliser l'action, soit la nature de l'objet, les auteurs ont montré que le cortex frontal inférieur est plus activé lorsque le sujet observe une action dont l'intention n'est pas celle attendue, suggérant que cette région est impliquée dans la compréhension de l'intention. Le réseau de la mentalisation est quant à lui recruté lorsque l'attention du sujet est explicitement dirigée vers l'intention de l'action qu'il observe. Par conséquent sur la base de l'analyse visuelle de l'action, le mécanisme miroir est sollicité dans la compréhension de l'intention d'une action (de Lange et al., 2008).

➤ **Prédiction de l'intention avant l'action**

Une autre façon de tester l'implication du mécanisme miroir dans l'intention d'une action est de répondre à la question : « Comment je sais ce que tu vas faire ? ». Quand une action donnée est planifiée, ses conséquences motrices attendues sont prévisibles car nous sollicitons nos représentations de l'action. Ce qui veut dire que lorsque nous allons exécuter une action, nous pouvons aussi nous représenter l'organisation de cette action jusqu'à sa finalité avant même de la réaliser, c'est-à-dire prédire ses conséquences. Si le mécanisme miroir contribue à la compréhension de l'intention cachée derrière une action, alors il doit être sollicité pour prédire les conséquences de l'action. La capacité à attribuer des états mentaux à autrui, c'est aussi être en mesure de prédire les comportements d'autrui. Si la simulation motrice permet d'accéder à l'état mental d'autrui alors le mécanisme miroir à la base de cette simulation devrait être activé quand on anticipe le comportement d'autrui.

Une étude a montré que les processus mis en jeu dans la préparation motrice de l'action que l'on va soi-même réaliser sont similaires à ceux nécessaires pour prédire l'action qu'un pair va effectuer (Ramnani et Miall, 2004). Par conséquent, le mécanisme miroir est sollicité pour prévoir l'intention d'autrui avant qu'il ne réalise l'action. Ce mécanisme permet donc d'accéder de façon anticipée à la compréhension de l'intention. Ces résultats ont été confirmés dans une étude où les sujets devaient prédire un mouvement d'atteinte d'une cible selon des repères spatiaux précis (Lamm et al., 2007). Les prédictions étaient non seulement rapides et correctes mais étaient sous-tendues par le mécanisme miroir ainsi que des régions cérébrales somato-sensorielles. Cette étude démontre que prédire une action active les mêmes réseaux que ceux impliqués dans la reconnaissance et l'anticipation d'une action.

L'ensemble de ces travaux apporte donc des preuves expérimentales de la contribution du mécanisme miroir dans la compréhension de l'intention d'une action.

😊 En quelques lignes...

Avec la découverte des neurones miroirs chez le singe puis d'un système analogue chez l'homme, un argument neurophysiologique est venu renforcer l'hypothèse de la théorie de la simulation motrice. Les représentations de l'action jouent un rôle essentiel non seulement dans l'organisation de nos comportements moteurs et de leur réalisation, mais aussi dans la perception et la compréhension des comportements d'autrui. Le phénomène de résonance illustre la correspondance entre le fait de percevoir et d'agir. Nous faisons l'hypothèse dans ce travail de thèse que ce mécanisme est *a fortiori* nécessaire pour comprendre une interaction sociale mise en lumière par sa seule composante motrice.

II. RECONNAITRE LE MOUVEMENT HUMAIN

Les êtres humains sont de toute évidence des êtres sociaux doués pour percevoir et reconnaître les actions réalisées par leurs pairs. Cette aptitude perceptive s'est développée pour que notre espèce survive face au danger des prédateurs en perpétuel mouvement puis elle s'est probablement affinée pour répondre à une nécessité « sociale » afin de comprendre, interagir et prédire le comportement de nos semblables. Riches des données comportementales et propulsées par l'essor de l'imagerie cérébrale, les recherches ont révélé l'identité des circuits cérébraux sous-tendant cette fascinante compétence visuelle. Pourtant bien que dévoilés d'hypothèses en protocoles, ces mécanismes centraux cachent encore bien des mystères. Comment un mouvement humain que nous percevons est-il porteur de sens ? Est-ce en souvenir d'un geste déjà vu ? Serait-ce grâce à la capacité de le réaliser soi-même ? Est-ce parce que ce geste nous « parle » ?

Dans ce second chapitre, nous avons choisi de présenter de façon non exhaustive les origines et les caractéristiques de la perception du Mouvement Humain (MH), notamment l'influence des informations visuelles mais aussi des composantes motrices de l'action. Nous interrogerons également la mise en place de cette aptitude perceptive en détaillant des études en développement. Enfin nous retracerons la découverte des régions cérébrales qui ont permis de comprendre les mécanismes centraux sous-tendant cette exceptionnelle compétence perceptive.

II. 1. Etudier le mouvement humain (MH)

Avant d'être des êtres intrinsèquement sociaux, nous sommes avant tout des êtres visuels ! Sensible à la netteté, à la résolution, aux contrastes et aux mouvements, notre système visuel s'adapte à toutes les situations de façon performante pour restituer le flux d'informations en une image rétinienne représentant notre environnement perceptif. Une des fascinantes caractéristiques de ce système visuel est sa capacité à reconnaître un MH. Avant de présenter brièvement le contexte théorique sur lequel s'appuient les travaux expérimentaux, nous allons remonter le temps pour découvrir les origines du modèle de référence utilisés dans les études sur le MH. C'est sur la base de ce modèle que nous avons construit l'ensemble des travaux expérimentaux de cette thèse.

II. 1. 1. Petit historique sur le modèle de référence

Depuis l'antiquité, les mouvements générés par les êtres vivants ont captivé les philosophes comme Aristote dans son traité sur le mouvement des animaux (traduit par P. Louis, première édition, 1973). L'invention de la photographie au 19^e siècle a apporté un souffle nouveau aux études sur le mouvement. D'abord, le travail du photographe américain Eadweard Muybridge (1830-1904) a fortement influencé ce domaine. À l'aide de plusieurs appareils photographiques, il décompose le mouvement humain (ou animal) en images successives illustrant les phases du mouvement (Figure 2). Néanmoins, cette technique ne permet pas de rendre compte précisément des différentes positions du sujet en fonction du temps.



Figure 2 : Série photographique réalisée par E. Muybridge intitulée Dancing (Fancy)

À la même époque, le physiologiste et physicien français Étienne-Jules Marey (1830-1904) s'inspire d'un dispositif destiné à enregistrer le mouvement des astres, pour mettre au point le fusil photographique, appareil permettant de photographier « sur nature » un être en mouvement sur 12 poses. Il invente ensuite la chronophotographie à plaque fixe : à l'aide d'un seul objectif (contrairement à la méthode de Muybridge qui utilise plusieurs objectifs) et avec des sujets sur fond noir, une plaque photographique est exposée plusieurs fois par un obturateur rotatif. Cet obturateur s'ouvre de façon périodique, avec des intervalles de temps réguliers, ce qui conduit à une trajectoire discontinue mettant en images les positions spatiales successives du sujet en mouvement. Cette technique présente un lourd inconvénient dans le cas de la locomotion humaine en raison de la faible vitesse du mouvement et de la large étendue de la zone de marche. Ainsi la surimpression des images résulte en un ensemble confus. Pour y palier, E. J. Marey a recours à une technique astucieuse qu'il emprunte au physicien suisse Louis Soret (1827-1890). Il s'agit de photographier dans un environnement

obscur des acteurs vêtus d'une combinaison noire, dotée de marqueurs incandescents attachés aux principales articulations (Figure 3). Cette méthode ainsi optimisée vise d'abord à « reproduire » le MH et ouvre progressivement de nouveaux champs de recherches consacrés d'une part à l'étude des caractéristiques du MH ainsi qu'à la perception du MH.

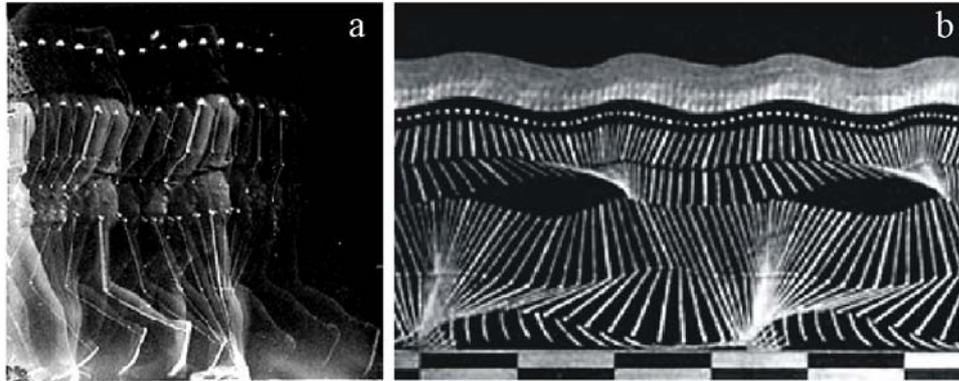


Figure 3 : Premières photographies de mouvements biologiques prises par E. J. Marey en 1884. Sur la photographie a, nous pouvons distinguer la personne de profil vêtue de la combinaison dotée de marqueurs attachés sur la tête et sur les articulations du bras et de la jambe. La photographie b restitue le changement spatio-temporel des positions d'un marcheur.

Etudier les caractéristiques de la perception du MH prend son essor en 1973 lorsque le psychologue suédois Gunnar Johansson (né en 1911) développe la technique des points lumineux animés (de l'anglais, *point-light display*) (Johansson, 1973). Cette méthode consiste à placer, sur les principales articulations d'un marcheur, dix marqueurs réfléchissants qui restituent, à l'aide de caméras, le mouvement tridimensionnel et dynamique sous forme de points. Johansson remarque que la présentation statique de cette configuration de points ne permet pas de produire l'impression d'une forme humaine. Les sujets n'entrevoient qu'un ensemble discontinu et insignifiant de points. Pourtant, lorsque les points sont en mouvement, le système visuel est capable d'organiser ce « nuage » de points en une perception évidente de forme humaine engagée dans des actions identifiables. Le système visuel est par conséquent capable d'extraire la « forme humaine » à partir du mouvement sur une fraction de seconde (Johansson, 1973). Ce type de mouvements modélisés par des points lumineux est nommé dans la littérature « mouvement biologique » (de l'anglais, *biological motion*). En effet, cette appellation recouvre le mouvement biologique réalisé par des êtres vivants, y compris les animaux (Pavlova et al., 2001). Dans ce travail, nous avons réduit cette expression à « mouvement humain » (MH) puisque nous nous intéressons spécifiquement aux mouvements réalisés par des êtres humains modélisés en points.

II. 1. 2. Deux théories explicatives

Le modèle élaboré par Johansson (Johansson, 1973) a offert la possibilité à la recherche fondamentale et appliquée d'explorer les remarquables capacités du système visuel à percevoir du MH. Les origines de cette compétence perceptive trouvent un fondement théorique dualiste : l'hypothèse de l'expérience visuelle et celle du couplage de la perception et de l'action. Cette opposition a contribué à l'expansion de nouveaux protocoles afin de valider ou d'invalider ces théories par de riches arguments empiriques. Nous ne présenterons que brièvement ces deux théories qui seront plus largement développées dans les travaux expérimentaux.

II. 1. 2. 1. La théorie de l'expérience visuelle

Selon la théorie de l'expérience visuelle, cette sensibilité visuelle pour le mouvement biologique, et plus spécifiquement le MH, s'expliquerait par la fréquence élevée de ce type de mouvements dans l'environnement social des êtres humains. Ainsi les mouvements réalisés par nos pairs sont plus fréquents et donc plus familiers que des événements visuels dynamiques comme ceux liés à la gravité (chute d'objets), aux forces naturelles (mouvements des branches d'un arbre) et autres (déplacement de véhicules etc.).

Depuis la naissance, l'être humain a acquis une importante expérience visuelle en observant ses pairs avec qui il évolue. Par conséquent, il a probablement développé une expertise visuelle pour extraire les éléments clefs de la configuration du corps tels que l'organisation « tête, tronc, bras, jambes », lui permettant d'élaborer ainsi une représentation spatiale du corps humain (Reed et al., 2003; Bosbach et al., 2006; Reed et al., 2006). Remise en cause par les études chez l'animal ou chez le nouveau-né, l'hypothèse visuelle s'est transformée en un champ d'investigation visant plutôt à comprendre les mécanismes perceptifs liés aux traitements de la forme ou du mouvement (voir les sections consacrées à la contribution visuelle et aux régions cérébrales).

II. 1. 2. 2. La théorie du couplage de la perception et de l'action

La théorie du couplage de la perception et de l'action propose que la sensibilité visuelle au MH résulterait d'un lien fonctionnel entre les systèmes visuel et moteur (Viviani et al., 1992). En d'autres termes, les êtres humains percevraient les MH qu'ils sont en mesure de réaliser. Dans leur étude comportementale, Reed et collaborateurs ont démontré que

l'utilisation du schéma corporel, c'est-à-dire de la représentation spatiale de son propre corps, permettrait de coder les mouvements exécutés ou les mouvements observés (Reed et Farah, 1995). En effet, ces auteurs ont montré que si des sujets bougeaient un de leurs membres pendant qu'ils observaient une autre personne réalisant le même mouvement, alors leur capacité à détecter des changements de positions du modèle était perturbée. De tels résultats soulignent donc l'existence d'un couplage entre l'exécution et la perception d'un mouvement. Par ailleurs, d'autres auteurs ont également démontré que la perception d'un mouvement était efficace si ce mouvement ne violait pas les principes de la « faisabilité » du mouvement (Viviani et Stucchi, 1992; Stevens et al., 2000), suggérant une fois encore que pour percevoir correctement un mouvement, le sujet doit être capable de l'exécuter.

Avec la découverte des neurones miroirs chez le singe (di Pellegrino et al., 1992 ; Gallese et al., 1996) et le système analogue (circuit frontopariétal) chez l'homme (Rizzolatti et al., 1996; Rizzolatti et al., 2001), la théorie du couplage de la perception et de l'action a connu une envolée spectaculaire. Celle-ci a pris corps dans le concept du mécanisme miroir que nous avons énoncé dans le chapitre précédent. Dans la section dédiée à la contribution motrice, nous développerons quelques travaux qui ont exploré cette question au moyen du modèle en points lumineux animés (Johansson, 1973).

😊 En quelques lignes...

Etudier les caractéristiques de la perception du mouvement humain (MH) repose sur la modélisation en points lumineux animés développée par Johansson (Johansson, 1973). Il s'agit de placer des marqueurs réfléchissants sur les principales articulations d'un marcheur qui restituent le mouvement sous forme de points. Le système visuel est capable d'extraire la « forme humaine » à partir du mouvement. Les origines de cette compétence perceptive trouvent un fondement théorique dualiste. Selon la théorie de l'expérience visuelle, la sensibilité pour le MH s'expliquerait par la fréquence élevée de ce type de mouvements dans l'environnement social des êtres humains. Selon la théorie du couplage de la perception et de l'action, cette sensibilité résulterait d'un lien fonctionnel entre les systèmes visuel et moteur : les êtres humains percevraient les MH qu'ils sont en mesure de réaliser.

II. 2. Origines et mécanismes de la reconnaissance du MH

Dans un premier temps, nous présenterons au travers de quelques études en comportement les invariants de la perception du MH ainsi que les différentes contributions visuelles et motrices à la perception du MH. Dans un second temps, ces contributions seront étayées et remises en cause à la lumière des travaux chez l'animal et chez l'enfant.

II. 2. 1. Analyse visuelle de la perception du MH

Le modèle de Johansson (Johansson, 1973) a permis d'ouvrir un champ d'investigation visant à explorer les capacités du système visuel de l'homme à détecter et à identifier les caractéristiques à la fois de l'acteur mais aussi de l'action portées par le MH. Dans cette section est proposé un aperçu des travaux comportementaux s'appuyant sur la contribution visuelle. En raison de l'importante littérature, nous avons sélectionné les travaux qui servaient davantage notre propos et nos choix méthodologiques.

II. 2. 1. 1. Les invariants de la perception du MH

Nombre d'études ont montré que les sujets adultes qui observaient des MH pouvaient aisément détecter à la fois l'identité et le sexe des acteurs (Cutting et Kozlowski, 1977; Kozlowski et Cutting, 1977; Pollick et al., 2005) ainsi que la nature des actions réalisées (Dittrich, 1993) et certaines subtiles caractéristiques du mouvement telles qu'estimer par exemple la force exercée pour soulever un objet (Shim et al., 2004) mais aussi les états émotionnels (Pollick et al., 2001) (Dittrich et al., 1996; Atkinson et al., 2004; Clarke et al., 2005; Chouchourelou et al., 2006). En modifiant les caractéristiques cinétiques d'un MH, le mouvement d'un bras par exemple, il est possible d'identifier différentes teintes émotionnelles comme une scène illustrant une personne frappant à une porte avec désespoir ou, au contraire, avec joie (Pollick et al., 2001). Comme nous le verrons par la suite, l'information cinétique (mais pas uniquement) semble nécessaire pour identifier différents types de mouvement. De plus, le nombre et la position des marqueurs permettent de déterminer bien plus que le sens de la locomotion, ils transmettent également des informations émotionnelles (Atkinson et al., 2004) et des informations à connotation sociale (Clarke et al., 2005).

Le modèle *princeps* de Johansson (Johansson, 1973) représente un MH facilement identifiable par l'observateur avec une configuration minimaliste de points. Cette sensibilité au MH est d'autant plus efficace que le nombre de points est augmenté et la durée d'exposition prolongée (Neri et al., 1998). Par ailleurs, la localisation des marqueurs, habituellement sur les articulations de l'acteur (Johansson, 1973), semble « guider » l'observateur pour repérer du MH, en fournissant notamment des indices spatiaux comme la position des poignets et des chevilles (Mather et al., 1992). Les marqueurs situés sur les épaules, coudes, genoux et hanches renseigneraient sur la configuration du corps permettant au sujet de détecter du MH même masqué dans du bruit de fond dynamique (« nuage de points ») (Pinto et Shiffrar, 1999). Ces données nous ont particulièrement intéressés pour l'élaboration de nos animations quant aux nombres de marqueurs à utiliser et à leurs positions stratégiques sur le corps de l'acteur (pour plus de détails, se référer à la partie Matériels et Méthodes).

Si la sensibilité au MH peut être « améliorée », elle n'en est pas moins robuste dans des conditions pourtant appauvries. Ainsi la perception du MH est efficace même sur des temps d'exposition brefs de l'ordre de 200 ms (Johansson, 1973) et en dépit de perturbations psychophysiques comme flouter les points, varier la position des points d'une séquence à l'autre, modifier la fréquence spatiale des points ou encore le contraste et la profondeur de champ du MH (Ahlstrom et al., 1997; Lu et al., 2006; Casile et Giese, 2006). La perception du MH a été également mise à l'épreuve par l'utilisation du bruit de fond dynamique masquant le MH. Elle reste néanmoins possible puisque les sujets parviennent à repérer le MH dans le « nuage de points » (Pinto et Shiffrar, 1999; Thurman et Grossman, 2008).

En revanche, la perception du MH est orientation-dépendante ce qui signifie qu'elle est fortement altérée par l'effet d'inversion, c'est-à-dire lorsque le MH est renversé de 180° (de l'anglais, *inverted* ou *upside-down*) (Sumi, 1984). Pourtant, si le sujet est placé tête en bas et qu'il observe des MH présentés à l'endroit, il ne rencontre pas de difficultés à distinguer du MH (Troje, 2003). L'image qu'il perçoit est alors celle d'un MH inversé. Ainsi la perception du MH ne semble pas tributaire des informations égocentriques (position du sujet) mais plutôt dépendante de l'orientation spatiale du MH. Si cette fois, l'orientation du MH est modifiée artificiellement, par exemple par une marche réalisée sur les mains (MH « faussement » inversé), alors le sujet parvient néanmoins à détecter le MH mais de façon moins efficace que si la locomotion est réalisée sur les pieds (Shipley, 2003). Par ailleurs, informer au préalable

le sujet que le MH sera présenté « à l'envers » ne lui permet pas de surmonter la difficulté (Pavlova et Sokolov, 2000). Ceci implique qu'une rotation mentale ne suffit pas. Néanmoins, si cette information sur l'inversion du MH est couplée à des indices contextuels (repères visuels) alors les performances sont améliorées et permettent au sujet de repérer du MH (Pavlova et Sokolov, 2003).

A la lumière de ces données expérimentales, il apparaît que l'analyse visuelle du MH est efficace, robuste et sensible à l'orientation.

II. 2. 1. 2. Mécanisme global ou local : Forme ou mouvement?

La nature même du MH - apparition d'une forme humaine (aspect global) à partir de points en mouvement (aspect local) - oblige à s'interroger sur la manière dont le système visuel traite l'information. Ainsi on peut s'interroger sur les propriétés perceptives requises pour réussir cette épreuve, notamment l'influence des informations locales dynamiques (mouvement des points) par rapport aux informations globales (forme du corps). Pour certains auteurs, les informations cinétiques seraient utilisées préférentiellement dans des épreuves de reconnaissance du MH (Mather et Murdoch, 1994) alors que d'autres auteurs ont montré l'importance des informations globales (Cutting, 1978; Beintema et Lappe, 2002; Beintema et al., 2006). En fait, les études abondent pour déterminer si l'un des processus lié au traitement de la forme (processus global) ou du mouvement (processus local) prédomine ou bien si leur rôle est complémentaire.

Le modèle de Johansson (Johansson, 1973) est le plus convainquant des exemples en faveur de l'importance du mouvement dans la perception de la forme. Par ailleurs, le MH contient peu d'informations sur les caractéristiques du corps. Pourtant les sujets identifient facilement des actions aussi variées qu'une course à pied (mouvement des jambes) ou qu'un service au tennis (mouvement des bras). Cette identification est possible même si le MH est masqué par du bruit de fond, créant ainsi des perturbations visuelles locales (Bertenthal et Pinto, 1994 ; Pinto et Shiffrar, 1999). Or ce masque est constitué de points identiques à ceux du MH (même information locale), ce qui conduit à invalider la prédominance du traitement local lié au mouvement des points. Il semble en effet difficile d'imaginer le sujet identifier le MH dans une sorte de « poursuite oculaire » de points dans le but de discriminer ceux appartenant au MH par rapport à ceux du bruit de fond. De plus, la perte de sensibilité pour du

MH inversé démontre que les mécanismes impliqués ne sont pas uniquement locaux. En effet, malgré une quantité d'informations dynamiques et une structure globale équivalentes, le sujet détecte difficilement le MH à 180° (Sumi, 1984). Ces données corroborent donc l'hypothèse du rôle des mécanismes globaux. Par ailleurs, le mouvement du corps humain est « souple » bien qu'il soit composé de parties rigides notamment entre deux articulations. Aussi la configuration articulée du corps humain repose sur des invariants de structure mais aussi de distance entre deux articulations. Ainsi, l'analyse visuelle s'appuie vraisemblablement sur la configuration globale du corps (organisation en « tête, tronc, bras, jambes ») (Bertenthal et Pinto 1994; Shiffrar et al. 1997). En faveur de cette hypothèse, une étude a montré que, si l'organisation structurelle du corps humain est perturbée, alors les sujets rencontrent des difficultés pour discerner la présence du MH (Pinto et Shiffrar, 1999).

Afin de dissocier l'influence de l'information de « localisation » par rapport à celle de « mouvement », Beintema et Lappe (2002) ont élaboré des animations de MH dans lesquelles la position des marqueurs n'était pas limitée aux articulations mais incluait aussi les membres (incompatibles avec les invariants rigides, énoncés précédemment), et chaque point changeait de position de façon aléatoire d'une image à l'autre (Beintema et Lappe, 2002). Bien que ces deux manipulations ne modifient pas la forme humaine *per se*, il peut paraître difficile de discerner un mouvement cohérent révélant le MH puisque les indices locaux changent sans cesse. Les sujets parviennent toutefois à identifier le MH qu'ils observent (Beintema et Lappe, 2002).

Ce principe de changement de position a également été utilisé pour créer des MH « arbitraires ». Ainsi les marqueurs d'une zone anatomique ont été « délocalisés » sur une autre zone, tout en conservant la cinétique initiale (Hiris et al., 2005). En d'autres termes, le point du poignet en mouvement est situé sur l'épaule, celui de l'épaule sur le genou etc. Ce déplacement artificiel des points d'une zone à une autre donne naissance à un MH « déformé » mais dont l'ensemble des mouvements de points est identique à ceux du MH classique. Ce type de MH est alors présenté aux sujets masqué dans un nuage de points dynamiques. Après entraînement, les sujets apprennent à détecter les « MH déformés » et ce, avec des performances voisines des tâches de détection du MH classique. Néanmoins, la stratégie employée par les sujets, basée sur des critères de repérage spatial de groupes de points, est très différente de celle utilisée dans la tâche standard de détection du MH ; ce qui rend la comparaison des deux tâches délicate voire contestable.

L'implication des processus locaux a été mise en exergue dans un protocole où les sujets devaient décrire des MH composés d'éléments particuliers tels que des horloges, des visages ou des objets en substitution des points (Hunt et Halper, 2008). Les résultats montrent qu'aucun sujet n'est capable de distinguer du MH, soulignant l'importance des informations locales à condition qu'elles soient simples et uniformes. Par conséquent, lorsque l'information locale est complexifiée, alors l'information globale n'est pas suffisante pour percevoir spontanément du MH.

Par ailleurs, comme nous l'avons précédemment abordé, certaines études ont montré que la sensibilité au MH est altérée lorsqu'il est présenté à 180°. Cet effet d'inversion a été attribué à un déficit dans le traitement de l'information globale (Reed et al., 2003). Pourtant cette hypothèse a été mise en défaut dans une étude menée par Troje et Westhoff (2006). Les auteurs ont utilisé le MH désorganisé (de l'anglais, *scrambled motion*) dans lequel le mouvement local des points est intact mais la trajectoire de chacun des points est modifiée de façon aléatoire. Ce type de MH perd ainsi sa structure globale de « forme humaine ». Selon les auteurs, si l'effet d'inversion est dû à un défaut du traitement global, alors le MH désorganisé devrait être perçu par les sujets. C'est exactement ce que démontrent leurs résultats. En effet, les sujets sont capables de déterminer le sens de la locomotion du MH ou de mouvements biologiques (chat et pigeon) lorsque ces mouvements sont présentés en mouvements désorganisés à l'endroit. De plus, leurs résultats montrent que l'information locale fournie par les mouvements des pieds (ou des pattes pour les mouvements biologiques) suffirait pour réussir cette épreuve. Les traitements locaux seraient responsables de la détection du MH. Ainsi, le mouvement du pied (ou de la patte) serait un indice prédominant pour détecter le MH et ce, en raison de notre position d'être vivant vertébré soumis aux lois de la gravité. Ils proposent donc l'existence d'un filtre visuel capable de sélectionner les caractéristiques du mouvement biologique et font l'hypothèse que ce mécanisme servirait de « détecteur de présence » d'autres animaux terrestres articulés. Ce système de détecteur serait commun aux espèces vertébrées et se développerait grâce à l'expérience individuelle ou par héritage phylogénétique (adaptation liée à l'évolution).

Sans aller jusqu'à généraliser à ce point les résultats, il nous semble opportun de souligner un biais expérimental. La frontière entre un MH désorganisé et du bruit de fond est mince. Comment, dans de telles conditions, peut-on juger de la direction du MH ? De plus, la consigne qui consiste à demander aux sujets de juger la direction du mouvement n'est pas

comparable à celle qui consiste à déterminer la présence ou non d'un MH. Le sujet adulte pourrait en effet chercher à optimiser ses réponses en repérant les indices spatiaux les plus pertinents pour y parvenir (Johnson, 2006). Utiliser l'information provenant du pied ne serait qu'une stratégie efficace pour répondre à la consigne. Nous examinerons par la suite si les travaux concernant les mécanismes cérébraux corroborent ces données comportementales.

II. 2. 1. 3. Mécanisme ascendant ou descendant ?

La perception du MH dépend-elle de processus ascendants de bas niveau dit « *bottom-up* » ou plutôt de processus descendants de haut niveau dit « *top-down* » ? Pour certains auteurs, il s'agirait d'un mécanisme de bas niveau, spécialisé dans le traitement des informations visuelles brèves au niveau temporel et de faible proximité spatiale tandis que pour d'autres, il s'agirait plutôt d'un mécanisme de haut niveau spécialisé dans le traitement des informations visuelles aux caractéristiques spatio-temporelles étendues. Pour tester les processus impliqués dans la perception du MH, Mather et collaborateurs (1992) ont fait varier les intervalles de temps (intervalle interstimuli, ISI) entre les images composant l'animation du MH (Mather et al., 1992). Ces auteurs ont émis le postulat que des ISI courts mettraient en évidence l'implication du traitement de bas niveau alors que les ISI longs solliciteraient les processus de haut niveau, notamment la mémoire de travail et les processus attentionnels. Leurs résultats montrent que la perception du MH est meilleure avec des ISI courts suggérant l'implication des processus de bas niveau dans l'analyse du MH. Pourtant, une autre étude a utilisé la méthode des ISI en complexifiant l'épreuve par l'ajout de bruit de fond dynamique pour masquer le MH (Thornton et al., 2002). Les résultats mettent en évidence que les processus attentionnels seraient sollicités pour des ISI longs mais aussi pour des ISI courts si l'épreuve est complexe (mouvements des points du masque dans la même direction que les points du MH).

Ces données expérimentales montrent que la perception du MH reposerait à la fois sur des mécanismes ascendant et descendant sollicités en fonction de l'exigence de la tâche expérimentale et de la complexité des animations. C'est d'ailleurs, le consensus actuel qui s'oriente plutôt en faveur d'un rôle complémentaire des mécanismes de bas et haut niveaux comme en atteste l'étude de Watson et collaborateurs (Watson et al., 2004). Ces auteurs ont mis en place un protocole de rivalité binoculaire qui consiste à présenter soit un MH à chaque œil, soit deux MH aux deux yeux en modifiant les caractéristiques du MH par la couleur des

points ou par la direction de la tête. Sur la base de ces données, les auteurs concluent que la dominance visuelle lors de ce conflit résulterait de l'intégration du traitement perceptif de haut niveau (responsable de la perception du MH) par inhibition des processus de bas niveau qui permettent l'analyse de l'information « brute » issue de chaque œil. Comme nous le verrons dans la partie dédiée aux corrélats centraux, l'implication des processus descendants notamment attentionnels semblent toutefois influencer, dans certaines conditions, les performances aux épreuves de perception du MH.

II. 2. 2. Apport de la phylogénèse et de l'ontogénèse

Tandis que l'homme peut identifier le mouvement biologique (MB) d'autres espèces animales (Pavlova et Sokolov, 2003; Jokisch et Troje, 2003), les animaux eux-mêmes présentent également une sensibilité aux MB (Dittrich et al., 1998; Regolin et al., 2000). Cette compétence partagée entre les espèces a été mise à profit pour étudier l'influence de l'expérience visuelle. En effet, le travail chez l'animal permet de tester « artificiellement » certains paramètres. Ainsi des poussins élevés dans l'obscurité, donc dépourvus d'expérience visuelle, ont été testés dans une tâche de préférence visuelle (Vallortigara et al., 2005). Ces animaux se dirigent préférentiellement vers le MB d'une poule (voire même d'une poule dont le mouvement est désorganisé) plutôt que vers du mouvement aléatoire. De façon plus surprenante, ces poussins semblent être « attirés » pour tout MB effectué par une espèce vertébré, même un prédateur potentiel tel qu'un chat. Les auteurs émettent l'hypothèse de l'existence d'un mécanisme cérébral qui permettrait aux animaux vertébrés de s'orienter vers des MB semi-rigides comme ceux de tout animal articulé. Cette aptitude serait bien antérieure à toute expérience visuelle, il s'agirait même d'une prédisposition du système visuel commun aux espèces vertébrées. Néanmoins, les auteurs s'interrogent sur la possibilité d'un tel système puisque les données expérimentales chez le nourrisson montrent que cette sensibilité pour du MH n'apparaît pas avant l'âge de quatre mois (Fox et McDaniel, 1982; Bertenthal et al. 1987).

Les études chez le nourrisson et l'enfant présentent deux avantages, d'abord elles permettent de cerner la période du développement où la sensibilité au MH apparaît, puis elles renseignent sur l'origine de cette aptitude (caractère inné ou acquis, apprentissage, maturation des structures cérébrales).

Concernant plus spécifiquement la perception du MH, elle a pu être étudiée chez le nourrisson grâce à des protocoles sur la préférence visuelle. Il s'agit d'évaluer le temps que passe le nourrisson à observer une animation illustrant du MH par rapport à une condition contrôle comme du mouvement aléatoire. Contrairement aux nourrissons âgés de deux mois qui ont suivi le même protocole, les nourrissons de quatre mois fixent davantage des animations présentant du MH que celles présentant des mouvements aléatoires (Fox et McDaniel, 1982). Il semblerait donc que cette sensibilité opère autour du 4^e mois de vie. Par ailleurs, cette sensibilité s'éteint lorsque le MH est inversé (Fox et McDaniel, 1982) et ce, de façon équivalente aux données chez l'adulte. A cinq mois, les nourrissons sont capables de discriminer un MH qui présente une perturbation dans la symétrie du corps quelle soit spatiale ou temporelle par rapport à un MH classique (Bertenthal et al., 1987; Booth et al., 2002). Dès l'âge de huit mois, la sensibilité au MH reposerait sur des mécanismes centraux, mis en évidence par des enregistrements en potentiels évoqués, similaires à ceux étudiés chez l'adulte, traduisant ainsi une maturité précoce des régions cérébrales notamment les régions pariétales (Hirai et Hiraki, 2005; Reid et al., 2006). Il faut cependant attendre l'âge de trois ans pour que les enfants, engagés dans une épreuve active de reconnaissance du MH (réponse attendue), aient des performances proches de celles des adultes ; le plafond des performances serait atteint autour de l'âge de cinq ans (Pavlova et al., 2001). Bien que la sensibilité visuelle au MH apparaisse à un stade précoce du développement, ces données expérimentales ne permettent pas de préciser si l'apprentissage visuel (familiarité pour le MH) ou une capacité intrinsèque sous-tendent cette aptitude. Jusqu'alors, les données expérimentales renforçaient l'idée que l'expérience visuelle était nécessaire ou bien que le système visuel n'était pas encore fonctionnel.

Deux récentes études chez le nouveau-né ont permis un exceptionnel pas en avant dans ce domaine de recherche. Notons dans un premier temps que le nouveau-né distingue un mouvement dit biologique qui se définit par certaines régularités⁶ par rapport à un mouvement non biologique (Meary et al., 2007). De plus, Simion et collaborateurs (Simion et al., 2008) ont mis en place un dispositif dans une maternité, offrant ainsi la possibilité d'explorer les capacités perceptives de nouveau-nés âgés d'une paire de jours, les plus jeunes ayant à peine 10 heures ! Cette étude visait à explorer les origines de la sensibilité au MB. Si cette

⁶ Ces régularités biologiques reposent sur la loi « puissance Deux-Tiers » qui lie la cinématique et la géométrie d'un point en mouvement.

sensibilité est indépendante de toute expérience, alors les auteurs font l'hypothèse que les nouveau-nés « préféreront » le MB au mouvement aléatoire et que cette perception sera altérée par l'inversion du MB. Pour ce faire, les auteurs présentent des MB illustrant des poules, plutôt que du MH, s'assurant ainsi que la forme non humaine est complètement inconnue pour le nouveau-né. Pour confirmer leurs données, ils ont pris soin d'utiliser deux paradigmes différents : l'habituation et la préférence spontanée, sur deux groupes de nouveau-nés. Pour finir, ils ont testé l'effet d'inversion sur un troisième groupe de nouveau-nés. Pour le protocole d'habituation, les nouveau-nés ont été divisés en deux groupes : l'un était exposé aux MB, l'autre aux MB désorganisés (mouvement non biologique) jusqu'à atteindre le seuil d'habituation. Afin de mesurer la préférence visuelle, les deux types d'animations (« nouvelle » et « déjà vue ») étaient présentés aux nouveau-nés. Les résultats montrent de façon significative que les nouveau-nés préfèrent regarder la nouvelle animation, ce qui souligne la capacité à distinguer très tôt un événement nouveau d'un événement connu. Les auteurs évaluent ensuite la préférence spontanée (sans phase d'habituation) dans un autre groupe de nouveau-nés pour tester une éventuelle prédisposition du système visuel à distinguer spontanément du MB. Les résultats montrent que deux tiers des nouveau-nés passent davantage de temps à observer du MB que du mouvement non biologique et qu'il n'y a pas de corrélation entre l'âge des nouveau-nés et le temps de fixation. Ces données sont cette fois en faveur d'une capacité visuelle pour le MB innée plutôt qu'acquise. Lorsque le MB est présenté à 180°, les nouveau-nés du troisième groupe passent significativement plus de temps à regarder le MB à l'endroit que le MB inversé. L'effet d'inversion est par conséquent retrouvé dès la naissance, la perception du MB est innée et dépendante de l'orientation. L'ensemble de ces travaux est la preuve expérimentale d'une prédisposition du système visuel de l'être humain à percevoir du MB sans aucune expérience requise. Par ailleurs, l'hypothèse d'un système de détection du MB commun à toute espèce vertébrée est reprise par les auteurs, soulignant que ce système pourrait être « performant » dès la naissance (Troje et Westhoff, 2006).

L'étude de Simion et collaborateurs (2008) a ainsi apporté un argument expérimental aux théories sur l'origine de la sensibilité visuelle pour le MB (cette étude n'a pas testé le MH). Cette compétence serait par conséquent innée et ne reposait sur aucun pré-requis tel que l'apprentissage ou l'expérience, qu'elle soit visuelle ou motrice.

II. 2. 3. Rôle de l'expérience motrice

Comme nous venons de l'aborder, la sensibilité au MH semble exister déjà chez le nouveau-né sans nécessairement impliquer l'apprentissage ou l'expérience. Cette sensibilité serait une sorte d'héritage phylogénétique « offrant » aux espèces vertébrées articulées un système de détection du MB. Si les travaux chez l'animal (Vallortigara et al., 2005) et le nouveau-né (Simion et al., 2008) invalident la théorie de l'expérience visuelle, de nombreux travaux valident en revanche la théorie du couplage de la perception et de l'action. En effet, si la préférence visuelle pour le MB est innée, la reconnaissance visuelle du MH permettant d'identifier, de façon parfois subtile, les caractéristiques des actions mises en scène au moyen du MH fait probablement appel à des représentations sensori-motrices. L'hypothèse de mécanismes centraux a d'ailleurs été proposée pour attester d'un lien fonctionnel entre les représentations sensorielles sollicitées lors de la perception d'une action et les représentations motrices utilisées lors de la planification de l'action (Decety et Grezes, 1999; Rizzolatti et Craighero, 2004). Dans cette section, nous nous sommes exclusivement intéressés aux études comportementales utilisant le modèle de Johansson (Johansson, 1973) pour donner corps à la théorie sensori-motrice.

S'il existe un couplage de la perception et de l'action, alors nous pouvons émettre l'hypothèse que la perception du MH serait facilitée pour des MH familiers et réalisables. Ainsi une étude a exploré les capacités des sujets à discriminer des MH possibles et impossibles (présentés dans le sens de lecture à l'envers, de l'anglais *backward*) sur la base de différentes vitesses de locomotion (Jacobs et al., 2004). Les sujets devaient juger lequel des marcheurs serait le plus rapide ; le temps de réaction ainsi que l'exactitude de la réponse étaient enregistrés. Les résultats montrent que les sujets sont plus performants pour reconnaître des MH réalisables selon les lois de la biomécanique du corps. Ces travaux soulignent le lien étroit qui existe entre les systèmes visuel et moteur dans l'analyse visuelle du MH. En effet, il semblerait que si le système moteur ne possède pas le programme moteur d'un MH dans son répertoire en raison par exemple d'une violation des lois de la biomécanique du corps alors le système visuel est moins performant pour discriminer ce type de MH.

Une étude a exploré le rôle de l'apprentissage moteur dans la perception du MH en postulant qu'un MH est perçu que s'il peut être exécuté (Casile et Giese, 2006). Avant et après apprentissage moteur, des sujets adultes ont réalisé une épreuve dans laquelle ils

devaient juger si les MH présentés étaient identiques ou pas. Ces animations mettaient en scène différentes locomotions dont les phases du cycle de marche étaient modulées. Cette coordination particulière de balancements des bras et des jambes a été apprise par les sujets sur plusieurs séances d'entraînement et ce, les yeux fermés. Cette condition « yeux fermés » a été choisie pour s'affranchir d'un éventuel impact de l'expérience visuelle. Les résultats montrent que les sujets sont plus performants pour reconnaître des MH identiques lorsqu'ils ont acquis le programme moteur qui permet de les réaliser. De plus leur performance visuelle était significativement corrélée à leur niveau d'exécution. Aussi les auteurs concluent que l'apprentissage moteur a une influence directe sur la reconnaissance visuelle d'une action indépendamment de l'expérience visuelle. En d'autres termes, l'acquisition d'un nouveau programme moteur pourtant non familier semble contribuer à l'amélioration de l'analyse visuelle de ce mouvement nouvellement appris.

Malgré ces arguments expérimentaux en faveur de la théorie sensori-motrice, nous pouvons néanmoins nous interroger sur l'existence d'un tel mécanisme dans des conditions où l'expérience motrice serait limitée. Nous proposons ainsi de décrire deux études développementales l'une chez le nourrisson où la motricité est en cours de « construction », l'autre chez des adolescents présentant des déficits moteurs congénitaux (leucomalacie périventriculaire⁷) et par conséquent une motricité altérée à des stades précoces du développement.

La première étude ne questionne pas directement la perception du MH en relation avec le développement moteur du nourrisson. Pourtant, elle renseigne sur les aptitudes précoces du nourrisson pour repérer du MH incompatible avec les lois physiques (Moore et al., 2007). Dans un protocole de préférence visuelle, des nourrissons âgés de six mois sont mis en présence d'animations où le personnage modélisé en points lumineux se dirige de gauche à droite dans différentes situations : seul, derrière une table ou traversant une table. Les résultats montrent que l'attention des nourrissons est davantage dirigée vers la scène où le MH viole les contraintes physiques des solides. Ces résultats sont robustes dans la mesure où des épreuves complémentaires contrôlent l'effet obtenu : le temps de fixation reste supérieur même si l'enfant observe du mouvement aléatoire « traversant » la table ou des scènes

⁷ Il s'agit d'une lésion cérébrale caractérisée par la mort de la matière blanche à proximité des ventricules cérébraux. Ce type de lésion affecte le plus souvent des enfants nés avant terme. Les personnes atteintes présentent généralement des problèmes de contrôle moteur ou d'autres retards de développement.

« table-MH » inversées. Ces travaux laissent à penser qu'à l'âge de six mois, le nourrisson maîtriserait le concept de solidité du corps humain mis en exergue par du MH. Aussi au-delà de la sensibilité au MH, le nourrisson aurait développé une représentation sensori-motrice qui lui permettrait de discerner des MH possibles et impossibles.

La seconde étude vise à évaluer l'impact d'un déficit précoce du système moteur (bien avant l'acquisition de programmes moteurs complexes) sur la perception du MH (Pavlova et al., 2003). Des adolescents atteints d'une leucomalacie périventriculaire et présentant des déficits plus ou moins sévères de la locomotion ont été évalués dans une épreuve de repérage du MH masqué par du bruit de fond. Les sujets réalisent des performances équivalentes quel que soit le degré des troubles locomoteurs. Aussi ces données ne corrèlent pas la performance au degré d'atteinte motrice. La capacité à programmer un acte moteur, même limité, semble suffisante pour développer des compétences perceptives pour le MH. Ainsi un développement moteur déficitaire mais partiellement fonctionnel ne semble pas altérer la perception du MH. Ces données renforcent l'idée d'un lien fonctionnel entre les systèmes visuel et moteur.

L'ensemble de ces données comportementales sont autant d'arguments en faveur de la théorie du couplage de la perception et de l'action. Cette contribution sensori-motrice repose-t-elle sur des corrélats centraux responsables de la perception du MH ?

😊 En quelques lignes...

La perception du MH permet de détecter et d'identifier les caractéristiques de l'acteur (identité, sexe, état émotionnel) mais aussi de l'action réalisée. Cette analyse visuelle est efficace (peu de points animés, brève exposition), robuste (malgré des éléments perturbateurs) et dépendante de l'orientation spatiale du MH (altérée par l'effet d'inversion). Cette compétence s'appuierait soit sur des processus liés au traitement de la forme (processus globaux), soit sur des processus liés au traitement du mouvement (processus local) voire sur une complémentarité des deux processus. Des mécanismes ascendants (*bottom-up*) et descendants (*top-down*) pourraient dans certaines conditions être sollicités.

Récemment, il a été montré que cette habilité est innée et ne repose sur aucun pré requis. Pourtant, le système visuel est d'autant performant pour détecter du MH que le système moteur possède le programme moteur du MH, même si ce programme est nouvellement appris. Ce lien fonctionnel entre systèmes visuel et moteur semble exister en dépit d'une expérience motrice limitée (nouveau-nés et personnes au développement moteur immature ou déficient).

II. 3. Les régions cérébrales de la perception du MH

La perception du MH est une compétence perceptive extraordinaire tant par son efficacité (brève exposition, condition appauvrie) que par sa richesse (attribut de l'acteur, état émotionnel, caractéristiques motrices des actions). Cette habilité est portée par un système visuel sophistiqué et performant, l'œil, mais résulte aussi d'une analyse visuelle précise soutenue par des mécanismes cérébraux complexes. Nous proposons dans cette partie d'illustrer le traitement visuel qui s'opère au grès des régions cérébrales. Nous ne listerons pas toutes les structures impliquées mais nous tenterons d'apporter une vision générale des étapes qui conduisent à transformer un flux lumineux en un MH. Nous avons fait le choix de ne présenter que les travaux expérimentaux qui ont utilisé le modèle de Johansson (Johansson, 1973) puisqu'il s'agit du modèle de référence dans ce travail de thèse.

II. 3. 1. Quand le flux lumineux devient une image

Le système visuel de l'être humain est un système éminemment sophistiqué et complexe, capable d'analyser le flux d'informations provenant de l'environnement telles que le mouvement, la couleur, la forme, la texture ou encore la luminosité, le contraste etc. Ce système organise alors les informations reçues pour restituer *in fine* une reproduction fidèle de notre environnement perceptif. L'œil est ainsi constitué de structures hautement spécialisées dans la détection, la localisation et l'identification des caractéristiques du flux lumineux. Ce flux lumineux est capté au niveau de la rétine par des photorécepteurs qui transfèrent ensuite l'information visuelle à des neurones puis à des cellules ganglionnaires. Les axones de ces cellules ganglionnaires quittent la rétine de chaque œil et forment les nerfs optiques qui se réunissent au niveau du chiasma optique. Les fibres de ces nerfs se répartissent ensuite pour former le tractus optique qui se termine au niveau des aires cérébrales dédiées au traitement visuel. Avant d'atteindre les aires cérébrales, les informations visuelles véhiculées par le tractus optique activent les neurones du noyau genouillé latéral du thalamus, une sorte de « station relais » qui agit comme une unité de filtrage. Les radiations optiques rejoignent ensuite le cortex visuel primaire (V1) nommé cortex strié.

C'est au niveau du cortex visuel extrastrié que se dessinent deux voies de traitement de l'information visuelle (Figure 4). La voie dorsale ou canal M (« magnocellulaire ») est constituée de cellules qui ne s'activent que lorsque le stimulus visuel est aligné avec l'axe de

leur champ récepteur, elles sont par conséquent sélectives de l'orientation, et de cellules qui déchargent lorsque le stimulus lumineux se déplace dans un sens donné, elles sont donc également sélectives de la direction. La voie dorsale est connue sous le nom de la voie du « where » (Mishkin et al., 1983) ou de « l'action » (Goodale et Milner, 1992) et elle est associée à la localisation spatiale (ou action guidée visuellement) et au traitement de l'information dynamique (mouvement). La voie dorsale est composée des aires nommées V1, V2, V5 / hMT+ et se termine au niveau du cortex pariétal inférieur.

Quant à la voie ventrale ou canal P (« parvocellulaire »), elle est également nommée la voie du « what » et associée à la reconnaissance de la forme et des objets (Mishkin et al., 1983). La voie ventrale est composée des aires V1, V2, V3, V4 et du lobe temporal inférieur comprenant les aires du complexe occipital latéral et du gyrus fusiforme. Cette voie est associée à la reconnaissance des formes et à la représentation des objets.

Par la suite, nous généraliserons la voie dorsale au traitement local du mouvement et la voie ventrale au traitement global de la forme.

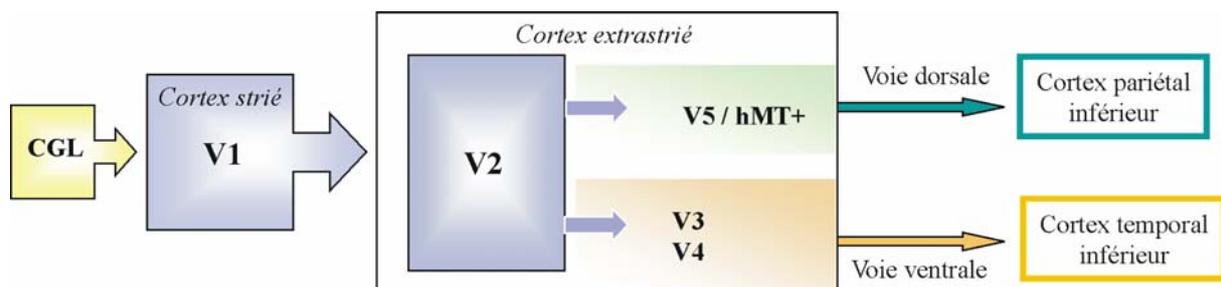


Figure 4 : Représentation schématique de la composition des voies dorsale et ventrale. CGL : corps genouillé latéral ; V1 : cortex visuel primaire ; V2 : cortex visuel secondaire.

II. 3. 2. Quand les voies dorsale et ventrale rencontrent le sillon temporal supérieur

II. 3. 2. 1. La spécificité du sillon temporal supérieur

Au 19^e siècle, une investigation *post-mortem* à laquelle s'évertuaient les médecins consistait à incriminer des régions cérébrales sur la base de symptômes qu'ils avaient observés chez leurs patients. Avec les progrès de l'imagerie cérébrale, ce sont les images anatomiques qui ont renseigné sur la localisation des lésions mise en relation avec les

performances des patients à des tests, par exemple, neuropsychologiques. C'est ainsi que des pistes se sont ouvertes pour identifier les régions impliquées dans l'analyse visuelle du MH.

Grâce à la neuroimagerie fonctionnelle, on a pu identifier pour la première fois l'implication du sillon temporal supérieur droit (STS) dans sa partie postérieure dans la reconnaissance du MH, en contrastant des animations présentant du MH par rapport à du mouvement aléatoire (Bonda et al., 1996). Dès lors, d'autres études sont venues confirmer le rôle du STS postérieur dans la perception du MH (Grezes et al., 2001; Vaina et al., 2001). Sur la base des données issues des études comportementales, des auteurs ont cherché à évaluer si la difficulté perceptive éprouvée lors de l'effet d'inversion du MH était corrélée à une variation de l'activité du STS. Les résultats montrent qu'en effet, le STS est moins activé lorsque le MH est inversé mais néanmoins plus activé qu'en présence du mouvement aléatoire (Grossman et Blake, 2001).

L'activation du STS peut également être provoquée par l'imagerie mentale mais avec une activation moins importante que dans une épreuve de réelle perception du MH (Grossman et Blake, 2001). Un blocage transitoire du STS induit par des stimulations magnétiques transcrâniennes (TMS) rend les sujets moins performants pour détecter du MH (Grossman et al., 2005). Les études sur des patients atteints d'une lésion temporale confirment que l'intégrité du STS est requise pour réussir des tâches d'identification du MH (Vaina et Gross, 2004).

Le STS pourrait être une région d'intégration polysensorielle, notamment de l'information véhiculée par les voies dorsale et ventrale. Initialement, le rôle du STS a été révélé lors d'enregistrements unicellulaires chez le singe pendant que l'animal visualisait des formes ou des mouvements de corps humain (Perrett et al., 1985). Cette région est nommée chez le singe l'aire polysensorielle du sillon temporal (STP) (Oram et Perrett, 1996). Le STP intègre les informations visuelles liées au mouvement et à la forme, ce qui a conduit à proposer cette région comme point de convergence des voies dorsale et ventrale. Par ailleurs, l'existence de connexions anatomiques entre les régions pariétale et temporale vers le STP ont appuyé cette hypothèse (Felleman et Van Essen, 1991).

II. 3. 2. 2. La complémentarité des voies dorsale et ventrale

Le cas de deux patients présentant des lésions bilatérales respectivement localisées au niveau du cortex occipito-pariétal (voie dorsale) et du cortex occipito-temporal (voie ventrale) a soulevé l'importance de la dichotomie fonctionnelle de ces deux voies. En effet, le patient atteint au niveau dorsal réussit des épreuves de reconnaissance d'objets alors qu'il échoue dans celles explorant les capacités d'organisation spatiale. L'inverse est observé chez le patient atteint au niveau ventral (Vaina, 1994). Les propriétés distinctes de ces deux voies de traitement de l'information visuelle ont été exploitées dans les études utilisant le modèle du MH.

Plusieurs études ont montré qu'une région extrastriée, localisée à la jonction occipito-temporo-pariétale, proche du complexe hMT+ / V5 est activée pendant la perception du MH (Grossman et al., 2000 ; Vaina et al., 2001; Peuskens et al., 2005). Cette région cérébrale, spécifique du mouvement, est recrutée dans l'intégration spatio-temporelle. Il a été proposé que cette région enverrait des afférences à la région du STS soulignant ainsi la convergence de la voie dorsale vers le STS (Grossman et al., 2000). Cependant, le rôle du complexe hMT+ / V5 dans la perception du MH n'a pas été confirmé puisqu'un blocage transitoire de cette région par TMS n'altère pas la perception du MH (Grossman et al., 2005).

Le gyrus lingual semble également impliqué dans le traitement du MH (Vaina et al., 2001; Servos et al., 2002). Cette région serait proche de l'aire visuelle V3 dont le rôle est d'intégrer à la fois les informations du mouvement provenant du complexe hMT+ mais aussi celles de la forme provenant des aires V1 et V2 (Servos et al., 2002). Le gyrus lingual, appartenant à la voie ventrale, pourrait être sollicité pour l'analyse de la forme humaine à partir de l'information dynamique (de l'anglais, *form-from-motion*) comme dans le cas du MH. Des structures cérébrales impliquées dans le traitement de la forme du visage et du corps ont été proposées comme FFA (de l'anglais, *fusiform face area*) (Grossman et Blake, 2002 ; Michels et al., 2005) et EBA (de l'anglais, *extrastriate body area*) (Michels et al., 2005) dans le traitement visuel du MH.

Sur la base de ces données, un modèle théorique a été proposé pour rendre compte du rôle complémentaire des voies dorsale et ventrale dans l'analyse visuelle du MH (Giese et Poggio, 2003).

II. 3. 3. Quand la perception du MH active des régions sensori-motrices

La capacité perceptive des êtres humains à reconnaître du MH permet de comprendre les actions réalisées par nos pairs. Comme nous l'avons souligné précédemment, la contribution motrice est importante dans la perception du MH. En effet, il semblerait que pour percevoir un MH, l'être humain doit être en mesure de le réaliser (Jacobs et al., 2004 ; Casile et Giese, 2006). Grâce aux études en imagerie cérébrale, la théorie du couplage de la perception et de l'action a trouvé corps dans le concept du mécanisme miroir dont le substrat cérébral est fronto-pariétal (Rizzolatti et Craighero, 2004). Le modèle en points lumineux du MH bien que réduit à des caractéristiques cinématiques permet d'illustrer des actions identifiables par l'observateur. Au-delà des régions dévolues au traitement visuel, le MH peut-il alors solliciter les régions impliquées dans l'observation d'une action ?

L'implication des régions frontales dans la perception du MH a été mise en évidence par l'étude chez des patients atteints de lésions au niveau du cortex prémoteur et du STS (Saygin, 2007). Les auteurs ont montré que le déficit de perception n'était pas imputable au dysfonctionnement d'une des deux régions ou une interaction négative entre les lésions. La relation causale entre la lésion et l'altération de la performance est significative du rôle des régions prémotrices dans le MH. Nous pouvons néanmoins nous interroger sur les raisons pour lesquelles ces structures n'ont pas été identifiées dans les travaux antérieurs. Une étude avait pourtant exploré cette question mais le paradigme n'avait pas permis de mettre en évidence ce circuit (Servos et al., 2002). La faible diversité de MH proposée ainsi que l'absence de consigne active en sont peut-être les causes. De plus, Grèzes et collaborateurs ont élégamment montré que les régions cérébrales engagées différaient en fonction de la procédure expérimentale. Si le sujet sait qu'il doit observer une action dans le but de la reproduire alors la voie dorsale et le cortex prémoteur sont plus activés que s'il a pour consigne d'observer uniquement l'action (Grèzes et al., 1998).

Par ailleurs il a été montré que des patients présentant des troubles attentionnels consécutifs à des lésions occipito-pariétales périventriculaires ont des difficultés à repérer des MH parmi de distracteurs visuels (Pavlova et al., 2005). Les auteurs en concluent que les processus descendants (top-down) seraient nécessaires pour percevoir du MH. Aussi les études qui ont mis en évidence les aires frontales ont veillé à ce que les sujets soient engagés

dans une tâche active (identifier les actions, repérer des MH colorés) et ont proposé des MH illustrant des activités variées. Le modèle de Johansson (Johansson, 1973) est donc suffisamment robuste pour activer le système de l'observation d'une action. Ainsi au même titre que des supports très réalistes tels que la vidéo, le modèle en points lumineux est un outil adapté et efficace pour étudier la reconnaissance des actions et les processus cérébraux qui y participent.

II. 3. 4. Quand le mouvement humain devient du mouvement social

Comme nous l'avons évoqué en début de chapitre, le modèle de Johansson (Johansson, 1973) permet de mettre en image des états émotionnels tout comme des caractéristiques subtiles d'actions que les sujets peuvent distinctement identifier (Dittrich et al., 1996; Pollick et al., 2001; Atkinson et al., 2004). Présenter deux acteurs modélisés en points lumineux permet aux sujets de juger le contenu émotionnel de la scène, bien plus facilement qu'en présence d'un seul acteur (Clarke et al., 2005).

Au-delà de la teinte émotionnelle, reconnaître un MH, c'est aussi le comprendre pour saisir les intentions d'autrui. Ce n'est par conséquent pas si étonnant que des études en imagerie cérébrale aient également mis en évidence des régions limbiques telles que l'amygdale lors de la perception du MH (Bonda et al., 1996). En outre, le STS fait partie du cerveau social au même rang que le cortex préfrontal, la jonction temporo-pariétale et l'amygdale (Saxe, 2006 ; Allison et al., 2000; Gallagher et Frith, 2003; Frith, 2007) et son rôle a été démontré dans la détection de l'agentivité voire l'attribution d'intention (Castelli et al., 2000; Wheatley et al., 2007).

Enfin comment expliquer que des personnes atteintes de schizophrénie (Kim et al., 2005), du syndrome de Down (Virji-Babul et al., 2006) ou d'autisme (Blake et al., 2003), et déficitaires dans la sphère sociale et motrice, soient en difficulté dans des épreuves de reconnaissance du MH ? Si la perception du MH permet à l'être humain de comprendre les comportements d'autrui, *a fortiori* elle doit également permettre de comprendre les interactions sociales entre individus. Quels processus ou stratégies cognitives y concourent ? Ces mécanismes, sont-ils mis à mal dans les pathologies « sociales » ? Mon travail de thèse s'articule précisément autour de ces questions, en particulier dans le contexte de la pathologie autistique.

😊 En quelques lignes...

La perception du MH active la partie postérieure du STS droit. L'existence de connexions anatomiques entre les régions pariétales et temporales vers le STS renforce l'idée que cette région serait un point de convergence des voies dorsale et ventrale. Ces voies joueraient un rôle complémentaire dans le traitement global (extraction d'une forme humaine) et le traitement local (mouvement des points) des informations issues du MH.

La perception du MH sollicite également le circuit fronto-pariétal, impliqué dans l'observation d'une action. Reconnaître un MH, c'est aussi saisir les intentions d'autrui qui peuvent aider à comprendre une interaction sociale. D'ailleurs, des personnes atteintes de pathologies « sociales » telles l'autisme semblent en difficulté pour reconnaître des MH. Qu'advient-il alors si le MH illustre une scène sociale ? Tel est l'objet de mon travail de thèse.

III. LE SPECTRE DE L'AUTISME

L'autisme est un syndrome comportemental caractérisé par des altérations qualitatives dans les relations sociales et dans la communication tant verbale que non-verbale mais aussi par des comportements stéréotypés et répétitifs. Ce qui déconcerte en premier dans l'autisme, ce sont véritablement les déficits sociaux et de communication. Pourtant ces déficits de la sphère sociale semblent émerger d'un iceberg bien plus complexe tant les dysfonctionnements sont nombreux et entremêlés.

L'hérédité de l'autisme est plus importante que celle du cancer du sein ou du colon, celle de la maladie d'Alzheimer ou la schizophrénie. La prédisposition génétique dans l'autisme est maintenant bien connue. Les altérations génétiques conduisent, entre autres, à des anomalies neuro-anatomiques qui se développent à des stades précoces du développement, pré et post-nataux. Pour le clinicien et le chercheur, les dysfonctionnements cérébraux qui en résultent ne sont observables qu'à travers l'expression comportementale. Ce sont d'ailleurs les troubles du comportement qui alertent en premier l'entourage, dès lors que l'enfant est supposé interagir avec son environnement.

III. 1. Un syndrome comportemental

III. 1. 1. La triade de symptômes

L'autisme infantile a été décrit pour la première fois en 1943 par le psychiatre américain Léo Kanner (Kanner L, 1943). Le terme d'autisme, du grec « *autos* » signifiant « repli sur soi », a été emprunté au psychiatre Eugen Bleuler qui décrivait, chez des patients atteints de schizophrénie, une perte volontaire et active de relation sociale avec l'environnement extérieur et les individus (Bleuler, 1930). Or Kanner voit dans le comportement des 11 enfants qu'il observe un trouble du développement relationnel et non un retrait volontaire, à l'opposé des patients schizophrènes. Ces premières observations restent encore de nos jours une référence et définissent « l'autisme de Kanner ».

De façon indépendante, le médecin autrichien Hans Asperger décrit en 1944 un groupe de quatre enfants présentant une « psychopathologie autistique » (Asperger, 1944). Certains symptômes décrits s'apparentent à ceux décrits par Kanner. Cependant deux aspects majeurs diffèrent dans le groupe d'enfants d'Asperger par rapport au groupe d'enfants décrit par

Kanner : un niveau langagier correct sans retard d'acquisition et la sphère motrice plus altérée (Szatmari et al., 1989; Eisenmajer et al., 1996; Gillberg, 1998). Pour Kanner et Asperger, les enfants qu'ils observaient étaient incapables d'entretenir des relations affectives normales avec autrui. Kanner rattachait ce syndrome à un trouble biologique : une « incapacité innée de constituer biologiquement le contact affectif ».

Parmi les signes majeurs observés par Kanner et traduisant des comportements atypiques communs, nous retiendrons particulièrement ceux qui illustrent notre problématique sur le mouvement du corps dans un contexte social. Dans ses notes, Kanner avait relevé que ces enfants présentaient des difficultés pour établir des relations sociales et pour communiquer que ce soit par la parole ou par les gestes (Kanner L, 1943).

La relation aux personnes ne semble s'établir que pour satisfaire une nécessité de l'enfant comme en témoignent les propos de Kanner « s'adresser aux gens quand il avait besoin d'eux ou voulait savoir quelque chose » ou encore « l'enfant n'apprenait à poser des questions ou à répondre aux questions, que si elles avaient un rapport avec un centre d'intérêt pour l'enfant, des comptines par exemple ».

Si le langage verbal se développe, il apparaît souvent à des stades tardifs du développement. Le langage est alors souvent correct et structuré « sa prononciation était claire et il avait un bon vocabulaire. La construction de ses phrases était satisfaisante ». Néanmoins le langage revêt un caractère inapproprié dans une communication adressée à autrui « des paroles hors de propos constituaient sa manière habituelle de parler », « toute sa conversation est un écho de tout ce qui a pu lui être dit ». Enfin, en dépit d'une habileté manuelle correcte et de stéréotypies gestuelles, Kanner souligne une pauvreté des gestes à visée de communication « B. a serré la main sur commande [...] il manquait à ce geste toute notion de salutation ». La communication non-verbale est pauvre par le regard et par les gestes.

Depuis la description princeps de Kanner (1943), le syndrome autistique est défini comme un trouble du développement apparaissant chez l'enfant avant l'âge de trois ans et caractérisé par des perturbations du fonctionnement au niveau des interactions sociales, de la communication verbale et non verbale et du comportement. Actuellement, les critères de la CIM-10 (Classification Internationale des Maladies) (WHO, 1992) et du DSM-IV (de l'anglais, *Diagnostic and Statistical Manual of mental disorders*) (APA, 1994) pour le diagnostic de l'autisme infantile sont les plus couramment utilisés. Ils présentent une bonne concordance et sont définis selon trois dimensions (Tableau 1) : altérations qualitative des

interactions sociales et de la communication ainsi que des intérêts restreints, répétitifs et stéréotypés. Dans ces deux classifications, l'autisme est considéré comme un « trouble envahissant du développement ». Les révisions successives du chapitre réservé au trouble autistique dans le DSM montrent la complexité d'une définition des critères essentiels au diagnostic de ce trouble. Retenons de plus que le caractère développemental de la pathologie engendre une grande variabilité clinique au cours du temps et entraîne des difficultés diagnostiques chez le très jeune enfant et chez l'adulte jeune. Le diagnostic différentiel porte principalement sur les troubles du développement du langage, le retard mental, les autres troubles envahissants du développement non spécifiés et enfin les privations environnementales.

L'autisme a pour caractéristique majeure un développement atypique avec des particularités non observées au cours du développement typique ou même retardé. L'évolution de ce syndrome est variable, irrégulière et très hétérogène d'un individu à l'autre. Il est par conséquent difficile de regrouper dans un seul et même syndrome de nombreuses manifestations comportementales et neurologiques diverses, apparaissant plus ou moins tardivement. C'est pour cette raison que le terme de spectre de l'autisme (de l'anglais, *Autism Spectrum Disorder*) est aujourd'hui utilisé (Tardif et Gepner, 2003). Le spectre de l'autisme se caractérise par un continuum, allant d'une atteinte sévère avec de nombreux traits autistiques, à une atteinte plus légère avec des manifestations plus discrètes et moins nombreuses, les signes cliniques étant variables en nombre et en intensité.

Dans ce travail de thèse, nous avons travaillé avec des enfants diagnostiqués avec autisme dit « de haut niveau » et des enfants présentant le syndrome d'Asperger. Ces patients présentent un quotient de développement supérieur à 70 et ne représentent qu'un quart des patients du spectre de l'autisme. Cependant, ils présentent des déficits dans les trois dimensions qui caractérisent les TED, avec toutefois une expression légère de ces troubles. Dans un souci de simplification, nous emploierons le terme générique d'autisme.

A. Un total de six (ou plus) parmi les éléments décrits en (1), (2) et (3), dont au moins deux de (1), un de (2) et un de (3) :

(1) altération qualitative des interactions sociales, comme en témoignent au moins deux des éléments suivants :

- a- altération marquée dans l'utilisation, pour réguler les interactions sociales, de comportements non verbaux multiples, tels que le contact oculaire, la mimique faciale, les postures corporelles, les gestes
- b- incapacité à établir des relations avec les pairs correspondant au niveau de développement
- c- le sujet ne cherche pas spontanément à partager ses plaisirs, ses intérêts ou ses réussites avec d'autres personnes
- d- manque de réciprocité sociale ou émotionnelle

(2) altération qualitative de la communication, comme en témoignent au moins deux des éléments suivants :

- a- retard ou absence totale de développement du langage parlé (sans tentative de compensation par d'autres modes de communication, comme le geste ou la mimique)
- b- chez les sujets maîtrisant suffisamment le langage incapacité marquée à engager ou à soutenir une conversation avec autrui
- c- usage stéréotypé et répétitif du langage ou langage idiosyncrasique
- d- absence de jeu de « faire semblant » varié et spontané ou d'un jeu d'imitation sociale correspondant au niveau de développement

(3) caractère restreint, répétitif et stéréotypé des comportements, des intérêts et des activités, comme en témoignent au moins un des éléments suivants :

- a- préoccupation circonscrite à un ou plusieurs centres d'intérêt stéréotypés et restreints, anormale soit dans son intensité, soit dans son orientation
- b- adhésion apparemment inflexible à des habitudes ou à des rituels spécifiques et non fonctionnels
- c- maniérismes moteurs stéréotypés et répétitifs
- d- préoccupations persistantes pour certaines parties des objets

B. Retard ou caractère anormal du fonctionnement, débutant avant l'âge de trois ans, dans au moins un des domaines suivants : (1) interactions sociales, (2) langage nécessaire à la communication sociale, (3) jeu symbolique ou d'imagination.

C. La perturbation n'est pas mieux expliquée par le diagnostic de syndrome de Rett ou le trouble désintégratif de l'enfance.

Tableau 1 : Critères du DSM-IV pour le diagnostic du trouble autistique

III. 1. 2. L'autisme en chiffres

La prévalence pour l'autisme est de 1 cas pour 1000 naissances alors qu'elle s'élève à 1 cas pour 250 naissances si on élargit au spectre autistique (Fombonne, 2003). Les dernières études épidémiologiques ont noté une augmentation du nombre de personnes atteintes d'autisme. Il ne s'agirait pas d'une recrudescence de cas, ces chiffres révélant plutôt une plus grande précision des méthodes de diagnostic et les progrès qui ont été fait pour repérer de plus en plus précocement des troubles autistiques observés chez de jeunes enfants. L'autisme touche 4 garçons pour 1 fille (Fombonne, 2003), ce sexe ratio a d'ailleurs conduit à suggérer une anomalie d'origine génétique touchant préférentiellement les garçons (lié au chromosome Y).

Au-delà de la triade de symptômes, d'autres symptômes ainsi que des pathologies d'origine génétique sont souvent associés à l'autisme. Cette co-morbidité conduit vers un tableau clinique hétérogène et rend les recherches étiologiques de l'autisme complexes. Le retard mental, qu'il soit d'origine génétique ou pas, est souvent associé à l'autisme puisqu'il recouvre près de 30 % des patients pour un retard mental léger à modéré et 40 % pour un retard mental sévère à profond, soit au total 70 % des personnes atteintes d'autisme (Fombonne, 2003). Par ailleurs, l'épilepsie est aussi associée à l'autisme avec une prévalence s'élevant entre 5 à 39 % des cas d'autisme (Tuchman et al., 2009).

😊 En quelques lignes...

L'autisme est un trouble envahissant du développement dont le diagnostic est posé avant l'âge de trois ans selon des critères comportementaux et qui perdure tout au long de la vie. La prévalence de l'autisme est très élevée ce qui constitue un intérêt de santé publique : près d'une naissance sur 250 présente un risque d'appartenir au spectre de l'autisme. Une triade de symptômes caractérise l'autisme incluant des déficits dans les interactions sociales ainsi que dans la communication verbale et non-verbale, et des comportements restreints et ritualisés.

III. 2. Une étiologie multigénique

Suspectée dans les premières études sur les groupes de jumeaux atteints d'autisme et confortée par les récentes découvertes d'altérations de gènes neuro-développementaux, la prédisposition génétique de l'autisme est aujourd'hui incontestée. Cependant, les gènes dont l'expression est impliquée dans l'autisme sont difficiles à identifier en raison de l'hétérogénéité des tableaux cliniques et génétiques. De nombreux travaux laissent à penser que plusieurs gènes seraient mis en cause, amenant certains auteurs à concevoir l'autisme non pas comme une entité singulière mais plutôt plurielle (« des autismes ») (Geschwind et Levitt, 2007 ; London, 2007).

Dans cette section, nous ne dresserons pas une liste exhaustive des gènes candidats, près d'une centaine faisant l'objet d'investigations (Lamb et al., 2002). En revanche, nous tenterons d'illustrer par des exemples précis d'anomalies géniques comment l'expression altérée d'un gène peut avoir de dramatiques répercussions sur des mécanismes physiologiques fondamentaux tels que la migration cellulaire ou la synaptogénèse.

III. 2. 1. Les pistes vers une origine génétique

III. 2. 1. 1. L'héritabilité de l'autisme

L'origine génétique de l'autisme a été mise en évidence dans les années 1970 dans une étude sur les groupes de jumeaux (Folstein et Rutter, 1977). Les auteurs ont comparé la concordance des troubles autistiques chez des jumeaux monozygotes (partageant le même patrimoine génétique) par rapport à celle de jumeaux dizygotes (deux patrimoines génétiques différents). Cette étude a montré que si l'un des jumeaux monozygotes est atteint d'autisme alors le second jumeau présente un risque élevé d'être également atteint d'autisme, et ce par rapport aux jumeaux dizygotes. Le risque d'être atteint d'autisme pour le second jumeau se situe entre 60 et 92 % pour les jumeaux monozygotes alors qu'il est inférieur à 10 % pour les jumeaux dizygotes (Bailey et al., 1995). Ces résultats soulignent l'influence des facteurs génétiques dans l'autisme. De nombreuses études épidémiologiques sont venues confirmer l'hypothèse qu'il existerait une prédisposition génétique dans le spectre de l'autisme (Ritvo et al., 1985; Steffenburg et al., 1989; Bailey et al., 1995).

Les études d'agrégation familiale ont renforcé l'idée d'une composante héréditaire dans la prédisposition à l'autisme. En effet, le risque d'être atteint d'autisme chez les frères et sœurs d'un enfant autiste s'étend de 2 à 6 % comparé à 0,1 % dans la population générale (Bailey et al. 1998). Les études de jumeaux et les études familiales ont également permis de montrer que la définition du phénotype « maladie » s'étend largement au-delà de l'autisme pour inclure des particularités sociales, verbales et cognitives, mineures mais proches du syndrome autistique et rencontrées chez les apparentés de personnes autistes (Gousse et al., 2002). De fait, parmi toutes les maladies psychiatriques, l'autisme est le syndrome le plus fortement génétique : l'héritabilité (variance génétique / variance phénotypique) est supérieure à 90 %. Pourtant les données obtenues dans les études génétiques sur les fratries n'ont pas encore permis d'établir de modèle de transmission génétique.

III. 2. 1. 2. La co-morbidité avec des pathologies d'origine génétique

La co-morbidité est la présence d'un ou de plusieurs troubles associés à un trouble ou une maladie primaire. Certains tableaux cliniques du spectre autistique sont associés à des pathologies d'origine génétique comme le syndrome de l'X fragile, le syndrome de Rett ou encore la sclérose tubéreuse de Bourneville. Le terme d'autisme syndromique est alors utilisé pour inclure ces patients « aux traits autistiques » qui représentent 10 % des cas d'autisme (voir pour revues, Abrahams et Geschwind, 2008; Smith et al., 2009). Cette forte occurrence avec des maladies génétiques renforce l'hypothèse d'une prédisposition génétique polymorphe, c'est-à-dire impliquant plusieurs gènes. Quant à l'autisme idiopathique, la cause n'est pas clairement identifiée bien que la prédisposition génétique soit l'étiologie la plus admise depuis deux décennies.

Par conséquent, la co-morbidité de l'autisme avec des pathologies neuro-développementales d'origine génétique apporte une preuve supplémentaire de l'hétérogénéité génétique de ce syndrome qui semble de surcroît toucher des gènes du développement.

III. 2. 1. 3. Facteurs épigénétiques et environnementaux

Concernant les jumeaux monozygotes, le risque d'être atteint d'autisme pour le second jumeau se situe entre 60 et 92 % (Bailey et al., 1995). Par conséquent, l'influence de facteurs non génétiques est à considérer, en particulier la probable interaction entre les gènes et l'environnement (Persico et Bourgeron, 2006b; Pardo et Eberhart, 2007; Deth et al., 2008). La Figure 5 donne une vue d'ensemble des facteurs génétiques et non génétiques qui pourraient

influencer le développement cérébral et expliquer la trajectoire neuro-développementale qui caractérise l'autisme. Pour certains auteurs, l'augmentation de la prévalence du spectre autistique ne s'explique pas seulement par les progrès de diagnostic mais pourrait être une des conséquences de l'industrialisation de notre environnement (Grether, 2006). En effet, l'exposition d'individus présentant une vulnérabilité génétique à des xénobiotiques⁸ (pesticides, métaux etc.) ou des neurotoxines (agents viraux) pourrait accroître les risques de pathologies neuro-développementales.

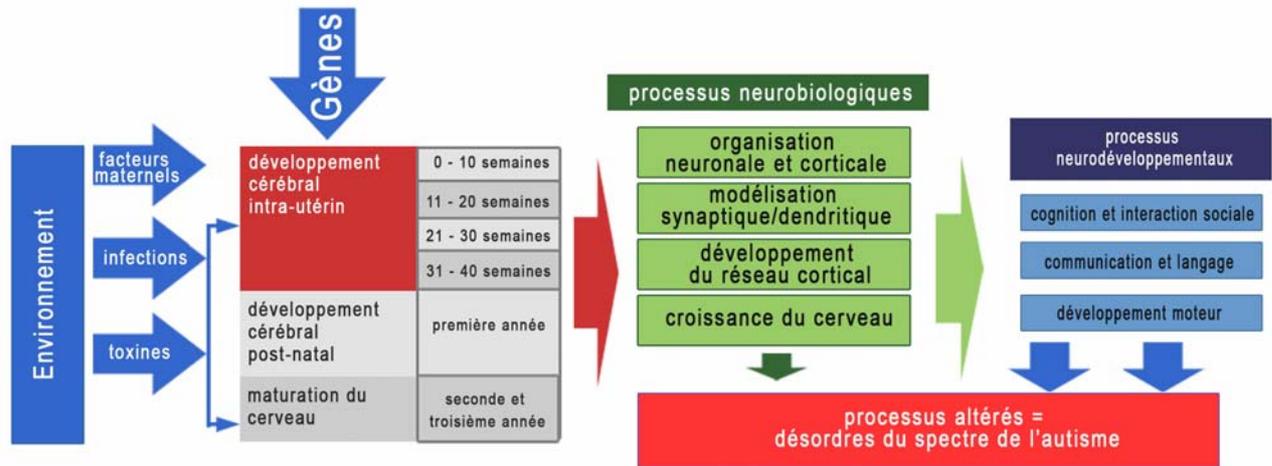


Figure 5 : Les facteurs génétiques et non génétiques qui pourraient intervenir à des stades intra-utérins et post-nataux et conduire à la trajectoire neuro-développementale si particulière dans l'autisme (Extrait de Pardo & Eberhart, 2007).

Sans entrer dans les détails de la chaîne biochimique, certaines substances toxiques libèrent dans l'organisme des éléments toxiques (stress oxydatif) contre lesquels luttent les systèmes de défense. Or ces substances inhibent l'activité des enzymes-clef dans les processus de protection. Des réponses adaptatives épigénétiques⁹ se mettent alors en place pour assurer la survie cellulaire. Cependant, si l'exposition aux toxines perdure alors ces réponses peuvent modifier les processus développementaux et conduire à des pathologies telles que des retards neurodéveloppementaux (Deth et al., 2008). Par ailleurs, les cellules neurogliales jouent un rôle prépondérant contre les substances nocives notamment dans la régulation des réponses

⁸ Les xénobiotiques sont des molécules chimiques polluantes et toxiques, « étrangères » à un organisme vivant.

⁹ Il s'agit de modifications réversibles et spontanées de l'expression des gènes en réponse par exemple à l'environnement. Ces modifications contribuent à la diversité biologique des individus.

immunitaires. Les astrocytes par exemple contribuent à la préservation de l'intégrité de la barrière céphalo-rachidienne et à la détoxification de substances nocives.

Chez les individus atteints d'autisme, il a été rapporté des taux plasmatiques de différentes enzymes et métabolites caractéristiques d'un stress oxydatif (voir pour revues, Pardo et Eberhart, 2007; Deth et al., 2008). De plus, des activations neurogliales importantes ont été observées dans les tissus cérébraux de patients atteints d'autisme traduisant des processus neuro-inflammatoires anormaux (Vargas et al., 2005). Ces réactions neuroimmunes contribueraient aux dysfonctions des systèmes nerveux centraux rencontrées dans l'autisme (Pardo et Eberhart, 2007). Par conséquent, si des individus présentant une prédisposition génétique comme cela est le cas dans l'autisme, sont exposés durant une période critique à des substances toxiques alors le risque que ces individus souffrent d'altérations neurodéveloppementales est accru (Persico et Bourgeron, 2006).

III. 2. 2. Hétérogénéité des mutations géniques

III. 2. 2. 1. Mutations spontanées fréquentes

A l'image des réarrangements chromosomiques qui ont permis l'évolution de notre espèce, le polymorphisme en termes de délétion et / ou duplication de quelques paires de nucléotides contribuerait à la diversité génétique des individus de l'espèce humaine (Sebat et al., 2004). Ces variations nucléotidiques (de l'anglais, *copy number variant, CNV*) peuvent se produire spontanément. Les CNV sont largement distribuées au sein du génome et sont fréquemment localisées près de réarrangements chromosomiques souvent mis en cause dans des pathologies développementales, reflétant ainsi l'instabilité de ces régions particulières. Des CNV ont été observées dans 70 gènes, notamment des gènes neuro-développementaux (Sebat et al, 2004).

Alors que dans la population générale la fréquence de ces mutations spontanées est estimée à 1 %, elle atteint 10 % chez les enfants avec autisme sporadique (un seul enfant atteint dans la famille) et 3 % chez les enfants avec autisme présentant une forte pénétrance (familles dont au moins deux enfants présentent des troubles autistiques) (Sebat et al., 2007). Compte tenu que ces mutations ne sont pas nécessairement « distribuées » au sein d'une même famille et que la fréquence des CNV est inférieure dans les familles à forte pénétrance, le caractère non héréditaire pourrait s'expliquer par la contribution des facteurs

environnementaux. Il a ainsi été proposé que le polymorphisme rencontré dans l'autisme conduirait à l'altération de gènes impliqués dans les systèmes défensifs ce qui aurait pour conséquence de fragiliser l'organisme, voire le système nerveux central, vis-à-vis de substances toxiques (Deth et al., 2008). Cette hypothèse est renforcée par la diminution des enzymes sollicitées contre le stress oxydatif qui a été mise en évidence dans l'autisme (James et al., 2006).

Par ailleurs, de nombreuses mutations spontanées ont été identifiées dans l'autisme et apparaissent sur des gènes impliqués dans la synaptogénèse, la migration et la prolifération neuronale. La plupart de ces mutations sont des délétions (dans 70 % des CNV) touchant des fragments d'ADN entre 160 kilobases à plusieurs mégabases, contenant parfois près d'une douzaine de gènes ! Dans la mesure où ces mutations touchent nombre de gènes neuro-développementaux, nous pouvons prédire que ces anomalies génétiques engendrent de profondes perturbations sur le développement des structures cérébrales. Bien qu'il soit encore trop tôt pour mesurer l'impact réel de ces mutations dans la susceptibilité à l'autisme, cet axe de recherche est très prometteur et contribue à mieux comprendre l'hétérogénéité de l'autisme.

III. 2. 2. Exemples d'altérations de gènes neuro-développementaux

Voici trois exemples qui illustrent comment une anomalie génétique peut engendrer des anomalies anatomiques et / ou fonctionnelles dans le cerveau. Nous nous sommes volontairement limités à ces mutations qui ne reflètent qu'une infime part des altérations géniques étudiées dans l'autisme. La Figure 6 met en relation certains de ces gènes aux processus neuro-développementaux.

- Gène de la reeline et migration neuronale

La reeline est une glycoprotéine de la matrice extracellulaire qui assure la migration des neurones et leurs connexions neuronales tout au long du développement. La mutation du gène codant pour la reeline provoque de sévères anomalies du développement cérébral chez les mammifères (Caviness et Rakic, 1978). Des anomalies du gène RELN codant la fabrication de la reeline ont été localisées sur le bras long du chromosome 7 de patients atteints d'autisme (Persico et al., 2001; Skaar et al., 2005). Des analyses quantitatives sur l'ADN du gène de la reeline issu de cerveaux *post-mortem* de patients adultes autistes

confirment que des mutations pourraient expliquer les anomalies cérébrales et cognitives décrites dans ce syndrome (Fatemi et al., 2005). Ces anomalies cérébrales concerneraient les aspects cytoarchitectoniques du cortex préfrontal, notamment les mini-colonnes (Casanova et al., 2006). Pour plus de détails, il est conseillé de voir la section neuro-anatomie.

- Gène de la neuroligine et systèmes excitateur-inhibiteur

C'est sur le chromosome sexuel X que des mutations de deux gènes, NLGN3 et NLGN4, ont été identifiées chez des patients atteints d'autisme (Jamain et al., 2003; Ylisaukko-oja et al., 2005). Or, ces gènes codent des protéines de la famille des neuroligines. Les neuroligines sont des molécules d'adhérence cellulaire localisées au niveau post-synaptique sur les synapses glutamatergiques et GABAergiques (neurotransmetteurs respectivement, excitateur et inhibiteur). Elles favorisent la formation des terminaisons pré-synaptiques lors des contacts axonaux. En d'autres termes, les neuroligines interviennent dans la synaptogénèse durant le développement du système nerveux central. Des mutations sur ces gènes conduisent à un déséquilibre synaptique en terme de balance des signaux excitateurs / inhibiteurs. La neurotransmission est donc perturbée ce qui implique d'importantes conséquences en particulier dans la synchronisation de l'activité cérébrale (Deth et al., 2008).

- Gène SHANK3 et induction dendritique

Une mutation sur le gène SHANK3 localisé sur le chromosome 22 a été identifiée chez des patients avec autisme (Durand et al., 2007; Moessner et al., 2007). Ce gène code une protéine synaptique d'échafaudage nécessaire à l'induction des épines dendritiques et à la connexion entre les neurones. Par ailleurs, cette protéine en se liant aux neuroligines joue un rôle dans la signalisation excitatrice. Ces mutations ont été associées à des troubles du langage et de communication chez des patients avec autisme (Durand et al., 2007).

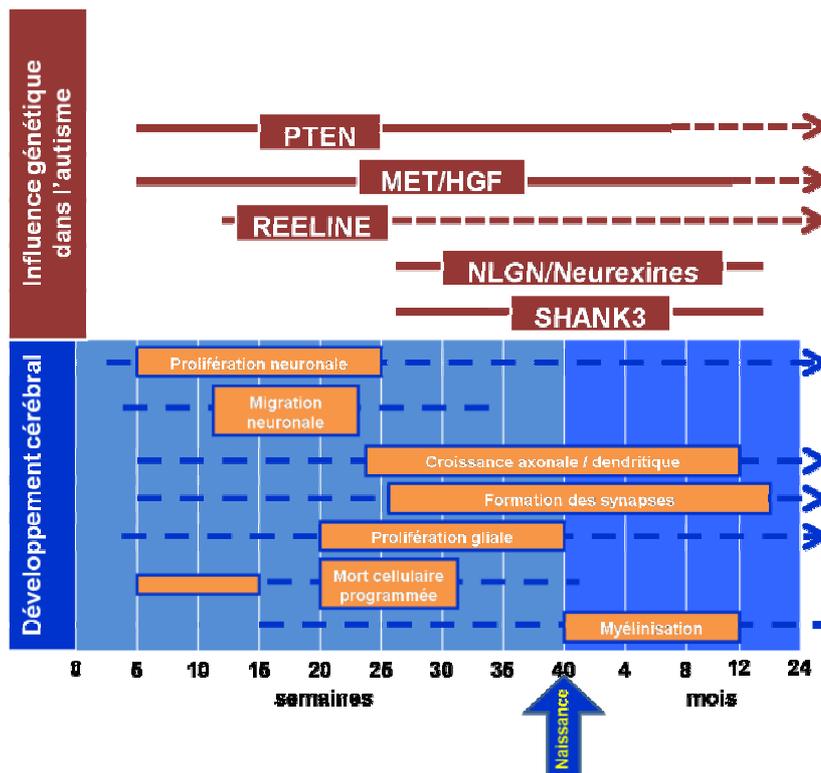


Figure 6 : De nombreux gènes associés à l'autisme pourraient influencer le développement cérébral à différents stades pré et post-nataux du développement de l'enfant. Ces gènes « interviennent » à des périodes critiques (ligne continue rouge) pendant des phases précises du développement (en orange). Cependant leurs zones d'influence peuvent s'étendre au-delà de ces périodes (lignes discontinues rouges). (Extrait de Pardo et Eberhart, 2007).

😊 En quelques lignes...

L'autisme est le syndrome le plus fortement génétique de toutes les maladies psychiatriques. Les études de concordance chez les jumeaux monozygotes et dizygotes, le fort risque dans les fratries et les études de ségrégation familiale montrent que l'autisme est indubitablement un syndrome polygénique (le phénotype est dû à l'interaction de plusieurs gènes) et qu'il présente, de surcroît, une hétérogénéité génétique importante (les gènes responsables varient d'une famille à l'autre). Les facteurs épigénétiques et environnementaux sont à considérer également dans l'étiologie de l'autisme. L'ensemble de ces facteurs peut entraîner un développement atypique du système nerveux central comme décrit chez des personnes atteintes d'autisme.

III. 3. Des anomalies neuro-anatomiques précoces

Lors du développement cérébral, l'expression des gènes que ce soit au niveau de la régulation ou de la transcription est régie par des voies de signalisations en cascade qui permettent *in fine* la prolifération et la migration des neurones ainsi que la communication synaptique conduisant au développement du système nerveux central. Ces différentes étapes opèrent *in utero* et se poursuivent à des stades précoces du développement.

Ces voies de signalisations sont probablement altérées dans l'autisme, mettant en péril le développement « normal » du cerveau. Par ailleurs, les premiers signes cliniques d'autisme apparaissent dans les trois premières années de vie de l'enfant. Or, c'est véritablement pendant cette période développementale que les réseaux cérébraux s'organisent. Cette période est donc une étape clé dans la compréhension des mécanismes centraux qui se mettent en place et qui dysfonctionnent dans l'autisme. De fait, il apparaît indispensable d'étudier la neuro-anatomie de l'autisme le plus tôt possible pour comprendre comment le système cérébral devient déviant. Pourtant, si les données anatomiques et fonctionnelles ont majoritairement été observées chez des patients adultes, ces données renseignent sur un système central établi depuis des années qui s'est, par conséquent, adapté aux dysfonctionnements qui lui sont propres. Ainsi le chercheur perd la « trace » des mécanismes cérébraux à l'origine des comportements et des troubles cognitifs qui caractérisent l'autisme.

Dans cette section, nous avons choisi de décrire les études chez le jeune enfant avec autisme. Elles sont également parfois mises en relation avec les études chez l'adulte autiste. Ces données informent sur un développement cérébral atypique précoce. Nous verrons par ailleurs que ces particularités évoluent avec l'âge et qu'elles sont spécifiques de certaines régions cérébrales. Cette spécificité régionale pourrait expliquer en partie les singularités cognitives rencontrées dans l'autisme.

III. 3. 1. Développement cérébral atypique

La mesure de la circonférence de la tête est un indicateur indirect du volume cérébral. Cette mesure souvent faite à la naissance est parfois répétée au cours l'enfance, et de fait renseigne sur la croissance cérébrale. Les analyses de mesures réalisées chez des enfants diagnostiqués *a posteriori* pour autisme, montrent que dans 90 à 95 % des cas, la circonférence de la tête est légèrement réduite à la naissance par rapport à des enfants non

autistes (Figure 7) (Courchesne, al., 2007). Puis, de façon surprenante, la circonférence de la tête de ces enfants augmente plus rapidement dès la première année de vie (Courchesne et al., 2001; Aylward et al., 2002; Hazlett et al., 2005). Plus précises, les données en imagerie anatomique indiquent que le volume cérébral d'enfants autistes âgés entre 2 et 4 ans est supérieur de 10 % par rapport à celui d'enfants non autistes du même âge (Courchesne et al., 2001).

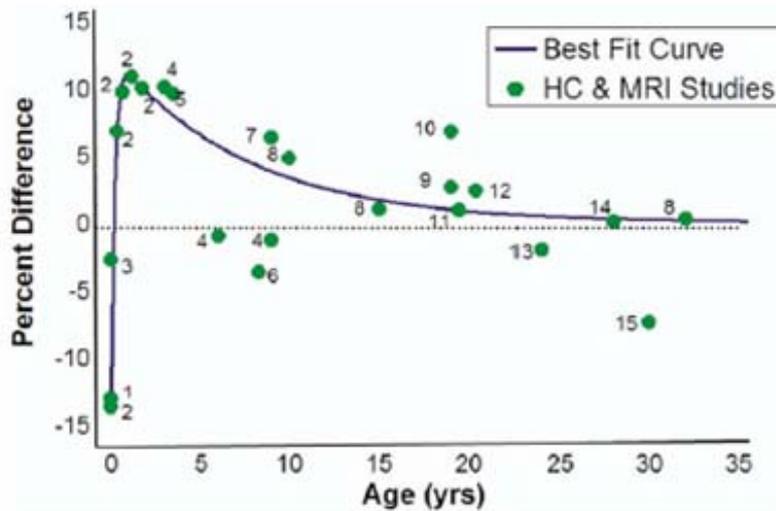


Figure 7 : Evolution de la circonférence de la tête de patients atteints d'autisme au cours du développement. Il s'agit de la différence en pourcentage par rapport à des valeurs normales obtenues chez des individus non-autistes (Extrait de Redcay et Courchesne, 2005a).

Après cette période de croissance « exagérée » s'ensuit une période de diminution (ou de stabilisation) du volume cérébral qui s'échelonne jusqu'à l'âge adulte. Le volume cérébral des adolescents et adultes autistes est proche du volume cérébral d'adultes contrôles (Redcay et Courchesne, 2005). Ainsi le développement cérébral dans l'autisme présente une singularité caractérisée par deux phases de croissance cérébrale : une phase de « surcroissance » dans les deux premières années de vie puis une phase de « ralentissement » au cours de l'enfance.

III. 3. 2. Des particularités anatomiques

III. 3. 2. 1. Surcroissance régionale chez l'enfant

Les études sur la neuro-anatomie des jeunes enfants atteints d'autisme sont encore peu nombreuses. Les résultats montrent néanmoins que la surcroissance cérébrale précoce n'est pas équivalente en tout point du cerveau. En effet, certaines régions cérébrales, comme les

lobes frontaux et temporaux ou encore l'amygdale et le cervelet, présentent une croissance plus importante que chez des enfants contrôles (voir pour revues, Courchesne et al., 2007 ; Stanfield et al., 2008). Ces régions sont précisément incriminées dans les déficits cognitifs décrits dans l'autisme. A titre d'exemple, l'élargissement de l'amygdale est positivement corrélé aux déficits sociaux et de communication observés chez des enfants autistes (Munson et al., 2006).

Concernant le volume de la substance blanche et de la substance grise, les résultats chez les enfants avec autisme ne sont pas clairs et semblent parfois dépendre de l'âge des enfants. Il a notamment été rapporté une augmentation de la substance grise dans les lobes temporaux chez des enfants autistes de 2 à 4 ans (Carper et al., 2002) alors qu'une diminution a été observée dans le STS d'enfants âgés de 9 ans (Boddaert et al., 2004).

III. 3. 2. 2. Ralentissement régional chez l'adulte

Les données neuro-anatomiques chez l'adulte avec autisme vont à contre-sens de ce que l'on pourrait attendre d'une croissance cérébrale qui s'est avérée précocement accélérée. En effet, il ressort de l'ensemble de ces travaux, une diminution globale du nombre de neurones, une dégénérescence cérébrale et une recrudescence des processus inflammatoires. Les régions concernées sont pourtant celles qui ont subi une croissance plus importante durant la prime enfance.

Ainsi l'amygdale (Schumann et Amaral, 2006) et le cervelet (Courchesne, 1997; pour revue, voir Allen, 2006) présentent une réduction globale du nombre de neurones. Cette perte neuronale pourrait être due à des processus de mort cellulaire associés à une activité gliale importante (Bailey et al., 1998). Un taux anormalement élevé de molécules à la fois pro- et anti-mort cellulaires a été mis en évidence dans le cortex frontal dont le volume est par ailleurs diminué chez des adultes autistes (Schmitz et al., 2007).

Des travaux ont également montré une faible épaisseur des régions frontales, temporales et pariétales chez l'adulte avec autisme (Hadjikhani et al., 2006). Des anomalies morphologiques du cortex ont été observées chez des adolescents atteints d'autisme notamment au niveau de la scissure de Sylvius, du STS, du sillon intrapariétal et du gyrus frontal inférieur (Nordahl et al., 2007).

III. 3. 3. Anomalie de la myélinisation

Les études en imagerie cérébrale anatomique informent sur le volume des régions cérébrales tandis que les études utilisant l'imagerie du tenseur de diffusion (de l'anglais, *diffusion tensor imaging* ou DTI) renseignent sur l'organisation structurelle de la substance blanche. En effet, la substance blanche ou gaine de myéline recouvre les axones des neurones et permet la transmission rapide de l'influx nerveux d'un neurone à l'autre. La myélinisation est un processus critique pour le développement cérébral puisqu'il permet la communication neuronale. Elle est maximale durant les premières années de vie de l'enfant bien qu'elle perdurerait tout au long de la vie. L'imagerie du tenseur de diffusion informe sur l'intégrité de l'organisation des fibres de myéline en mesurant la diffusion des molécules d'eau au sein des fibres et apporte également des indications précieuses sur la maturation des fibres nerveuses (Klingberg et al., 1999).

Des anomalies structurelles de la substance blanche ont été rapportées chez de jeunes adolescents atteints d'autisme dans le cortex temporal supérieur, la jonction temporo-pariétale et le corps calleux (Barnea-Goraly et al., 2004). Une myélinisation précoce a été mise en évidence dans le cortex frontal, en particulier le cortex préfrontal dorso-médian de l'hémisphère gauche (Ben Bashat et al., 2007). Une étude chez des enfants autistes a également montré que la quantité de substance blanche était en excès surtout dans les cortex frontaux et temporaux (Herbert et al., 2004). Chez l'adulte autiste, on trouve dans les lobes temporaux des anomalies de la structure de la matière blanche (Lee et al., 2007).

La perturbation de la myélinisation retrouvée au sein des lobes frontaux suggère que la connectivité anatomique à courte distance, c'est-à-dire entre régions proches, est excessive et désorganisée alors que la connectivité anatomique à longue distance, entre le cortex frontal et les autres régions cérébrales, est réduite (Courchesne et Pierce, 2005 ; Geschwind et Levitt, 2007). L'hypothèse d'une connectivité à deux niveaux a également été soulevée par des études sur la connectivité fonctionnelle entre des régions frontales et temporales et les autres régions cérébrales. Dans des tâches cognitives, il a été montré que des régions qui fonctionnent en réseau chez des adultes contrôles présentent une connectivité réduite chez des adultes atteints d'autisme. Ces résultats soulignent l'existence de régions avec une intense connectivité interne et des régions avec une connectivité réduite (Courchesne, et al., 2007). Ce déséquilibre de connectivité intra- et inter-régions cérébrales peut être une des explications

aux dysfonctionnements de certains réseaux fronto-pariétaux observés chez des patients autistes (Kennedy et Courchesne, 2008).

😊 En quelques lignes...

Le développement cérébral de l'enfant avec autisme est atypique : accéléré en début de vie, il ralentit par la suite. Des régions comme le cortex frontal et temporal ou encore le cervelet et l'amygdale présentent un volume nettement supérieur chez de jeunes enfants atteints d'autisme en comparaison à des enfants de développement typique. Chez les adultes, une réduction du nombre de neurones et du volume de ces mêmes régions semble consécutive à des processus inflammatoires exagérés. Les processus de myélinisation se mettent en place précocement et de façon désorganisée dans l'autisme et traduisent une organisation anormale des fibres de myéline. Il en résulte une connectivité intra et inter-régionale particulière. Il n'est par conséquent pas étonnant de voir s'ajouter à ce tableau morfo-anatomique des fonctionnements cérébraux tout à fait particuliers dans cette pathologie.

III. 4. Théories cognitives et leurs corrélats cérébraux

A l'heure actuelle, le diagnostic d'autisme s'effectue sur la base de critères comportementaux. Pour comprendre les mécanismes qui conduisent à ces particularités comportementales, des fondements théoriques sont nécessaires. C'est en partie grâce aux théories cognitives qu'il est possible de mettre en relation les comportements déviants et les processus centraux supposés défaillants.

Avant de préciser les dysfonctionnements cérébraux observés dans la perception sociale, nous souhaitons aborder trois théories qui nourrissent les protocoles expérimentaux : la théorie de la cohérence centrale, la théorie des fonctions exécutives et la théorie de l'esprit (pour revues, voir Frith et Happe, 1994; Hill, 2004; Baron-Cohen, 2004; Happe et Ronald, 2008; Geurts et al., 2009). Une nouvelle fois, nous resterons synthétiques dans ce domaine en explorant brièvement le corps général de ces fondements théoriques étayés par des éléments neurophysiologiques.

III. 4. 1. Cohérence centrale

Alix est une petite fille qui s'exprime avec une éloquence d'adulte. Sa prosodie si particulière dirige l'attention vers la richesse de son vocabulaire et l'élégance de ses tournures de phrases. Quand j'ai rencontré Alix, j'ai été étonnée de constater à quel point son comportement était bivalent : tout en regardant les escaliers du service, elle décrivait le détail des menus d'un repas auquel elle me conviait ! Le discours unilatéral qu'elle entretenait consistait en une liste précise des ingrédients culinaires qu'elle semblait connaître et apprécier. J'ai ensuite appris que la restauration était une occupation qui la captivait.

Scène extraite d'une passation au Centre de Ressources Autisme de Bordeaux. Juillet 2007.

III. 4. 1. 1. La théorie cognitive

Cet exemple illustre l'intérêt que portent les individus avec autisme à des détails appartenant à un domaine particulier.

La théorie de la cohérence centrale fait appel à un traitement de l'information qui consiste à utiliser les informations locales pour constituer un ensemble cohérent, et ce de façon appropriée selon le contexte (Frith et Happe, 1994; Happe et Frith, 1996). Ce traitement requiert des processus attentionnels et mnésiques. Les individus avec autisme présentent un profil cognitif singulier où l'intérêt pour le détail prédomine (Shah et Frith, 1993 ; Frith et Happe, 1994). Ils sont par exemple très compétents dans l'épreuve des figures encadrées (de l'anglais, *embedded figure task*). Cette épreuve consiste à repérer une figure cible masquée dans un ensemble ce qui nécessite des capacités d'abstraction du contexte.

Nombre d'épreuves expérimentales ont ainsi mis en évidence une faible cohérence centrale chez des personnes autistes (pour revues, voir Lopez et Leekam, 2007; Happe et Booth, 2008). Cette incapacité à intégrer des fragments en un objet complet s'étend au domaine du langage puisque les personnes avec autisme ne rattachent pas forcément la signification d'un mot au contexte dans lequel il est employé (Happe, 1997; Jarvinen-Pasley et al., 2008). A ce sujet, Kanner notait « Les mots avaient pour lui un sens exclusivement littéral, inflexible. Il semblait incapable de généraliser, de transférer une expression à un objet ou à une situation semblables » (Kanner L, 1943). Un mot donné a souvent une signification figée pour ces personnes autistes et ce, en dépit du sens global de la phrase : il signifiera toujours la même chose. Les mots ayant un double sens ou un aspect métaphorique seront compris de façon littérale et non en fonction du contexte.

Cette théorie de faible cohérence centrale donne des clés pour comprendre la nécessité obsessionnelle qu'éprouvent les individus autistes à la constance et à la complétude. En effet, l'environnement dans lequel tout être humain évolue est voué aux changements : le déplacement des êtres et des objets, la nature des activités, l'organisation des journées etc. De fait, la tendance des personnes autistes à focaliser leur attention sur des détails au détriment des aspects globaux peut rendre la vie quotidienne très perturbante. Cette théorie peut expliquer les comportements ritualisés et les angoisses vécues au moindre changement par ces personnes. Néanmoins, une alternative de cette théorie rend compte des « îlots de compétences » décrits chez des patients autistes tels que des aptitudes pour des dessins précis, la mémoire des dates d'anniversaire et les capacités de calculs mentaux. Ces aspects « positifs » de la faible cohérence centrale s'intègrent dans la triade de compétences (Figure 8).

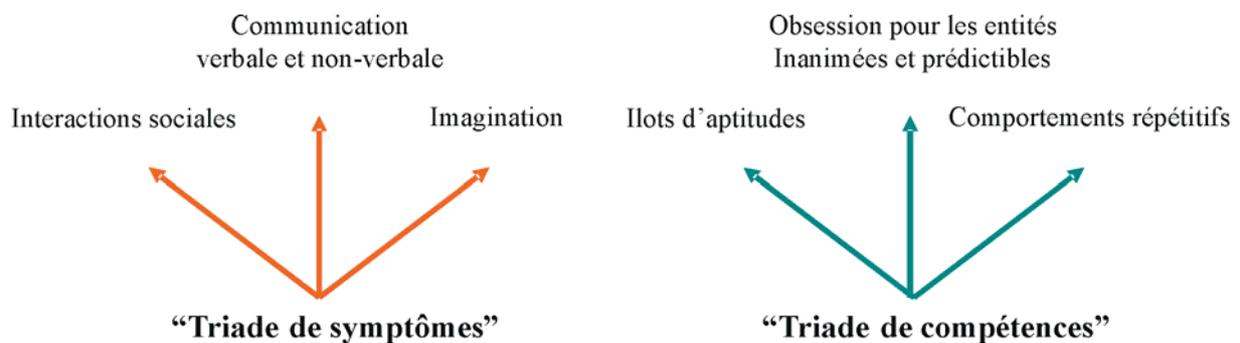


Figure 8 : Les triades de forces et de faiblesses qui caractérisent l'autisme (Adapté de Baron-Cohen, 2004)

III. 4. 1. 2. Les corrélats centraux sollicités

Les bases neurophysiologiques à ce corps théorique reposent sur les mécanismes de traitements locaux et globaux. Il a été mis en évidence chez des individus de développement typique que le gyrus lingual est recruté pour le traitement global alors que le cortex occipital inférieur est activé pour le traitement sur l'information locale (Fink et al., 1997).

Dans l'autisme, une sous-connectivité entre des régions dévolues au traitement perceptif basique et les régions qui sous-tendent des processus de modulation des informations de haut-niveau expliquerait ce traitement préférentiel pour les informations locales. C'est ce qu'ont montré des études en imagerie fonctionnelle utilisant l'épreuve des figures encadrées (Ring et al., 1999; Manjaly et al., 2007). Les individus avec autisme

présentent une forte activation dans les régions visuelles primaires et dans le cortex extrastrié tandis que les sujets contrôles montrent une activité dans le cortex prémoteur et pariétal. Ces données suggèrent que les personnes autistes ne présentent pas forcément un déficit du traitement global mais développent un style cognitif privilégiant le traitement local (Plaisted et al., 2003; Mottron et al., 2006).

III. 4. 2. Fonctions exécutives

Enthousiaste, Julien s'apprêtait à effectuer l'épreuve que je lui proposais. Dès le premier exercice, Julien appuyait plusieurs fois sur la touche qui lui servait à répondre. Je pris le temps de lui expliquer qu'un appui suffisait pour que l'ordinateur enregistre sa réponse. Après des réponses hâtives ou répétées, Julien s'est néanmoins engagé dans l'épreuve avec beaucoup d'attention. Lorsqu'il a fini l'épreuve, je l'ai félicité en lui remettant un diplôme. Julien l'a refusé et a insisté pour poursuivre les exercices. Pour apaiser son mécontentement, je lui ai proposé un dernier exercice. Cela n'a en rien satisfait Julien puisqu'il a quitté la pièce en s'exclamant « Moi, j'aime les points. Je suis très en colère ».
Scène extraite d'une passation au Centre de Ressources Autisme de Bordeaux. Juillet 2008.

III. 4. 2. 2. La théorie cognitive

Chez cet enfant atteint d'autisme, cet épisode met en exergue un problème d'inhibition motrice lorsqu'il ne parvient pas à contenir ses réponses mais également une inflexibilité cognitive lorsqu'il manifeste une intolérance à la frustration. L'inhibition et la flexibilité mentale font partie des fonctions exécutives au même titre que la mémoire de travail, la planification ou encore l'organisation et l'initiation de séquences motrices. Les fonctions exécutives recouvrent toutes les « étapes cognitives » qui mènent à la réalisation d'une action dirigée vers un but (Ozonoff et al., 1991). Toutes ces étapes requièrent la construction et l'utilisation de représentations internes qui, en passant par des processus de planification, d'organisation et de préparation de mouvements dirigés vers un but, nourrissent l'initiation et l'exécution d'une action intentionnelle.

Les déficits dans les fonctions exécutives ont initialement été décrits chez des patients atteints de lésions focales au niveau des lobes frontaux. Le cas de Phinéas Gage est un illustre exemple de patient atteint de syndrome frontal (Damasio et al., 1994). Les comportements

répétitifs et les intérêts restreints observés dans l'autisme tels que la persévérance, les conduites ritualisées, la rigidité mentale sont proches des symptômes rencontrés chez des patients souffrant d'une lésion frontale. C'est donc par analogie que la théorie des dysfonctions exécutives a été proposée pour expliquer certains symptômes autistiques (Damasio et Maurer, 1978).

Les familles, les cliniciens et les éducateurs rapportent des difficultés quotidiennes dans les aspects exécutifs chez les personnes avec autisme. Pourtant les études expérimentales ne traduisent pas clairement des différences de performances par rapport à une population d'individus non-autistes, ni ne parviennent à spécifier distinctement la ou les dimensions des fonctions exécutives qui seraient atteintes (Schmitz et al., 2006; Sanders et al., 2008; Kenworthy et al., 2008; Geurts et al., 2009).

Si les processus d'inhibition semblent préservés (pour revue, voir Hill, 2004), les déficits de flexibilité cognitive semblent davantage dépendre des procédures expérimentales et de l'imbrication d'autres processus relatifs aux fonctions exécutives plutôt que de réelles difficultés rencontrées par les patients (pour revue, voir Geurts et al., 2009). En revanche, la planification de l'action semble admise comme le processus exécutif le plus altéré dans l'autisme (Booth et al., 2003; Geurts et al., 2004; Hill et Bird, 2006), en particulier la planification d'une action intentionnelle (Zalla et al., 2006; Fabbri-Destro et al., 2009). L'hypothèse d'un déficit dans la construction ou dans l'utilisation des représentations de l'action a été proposée dans l'autisme (Schmitz et al., 2003) soulignant des difficultés dans la réévaluation et la réactualisation des représentations d'un acte moteur conduisant à une action finalisée et dirigée vers un but.

III. 4. 2. 2. Les corrélats centraux sollicités

Les régions cérébrales impliquées dans les fonctions exécutives chez des adultes avec autisme ont été étudiées (Schmitz et al., 2006; Kana et al., 2007; Shafritz et al., 2008; Gilbert et al., 2008). Bien que les performances soient généralement équivalentes entre les individus avec autisme et le groupe contrôle, les patrons d'activité cérébrale sont différents de ceux rencontrés dans la population non-autiste.

Des activations plus importantes ont été rapportées chez les individus avec autisme dans le gyrus orbitofrontal et le gyrus frontal inférieur de l'hémisphère gauche dans une épreuve d'inhibition motrice, l'insula gauche dans l'inhibition d'inférence et les lobes

pariétaux dans la flexibilité cognitive (Schmitz et al., 2006). Une hyperactivation du cortex préfrontal rostro-médian a été observée chez des individus avec autisme dans une tâche de flexibilité mentale (Gilbert et al., 2008).

A l'inverse, une hypoactivation a été mise en évidence dans le groupe avec autisme lors d'une épreuve de flexibilité cognitive dans les régions frontales, pariétales et striatales (Shafritz et al., 2008). Une hypoactivation a également été observée dans le cortex cingulaire antérieur dans une épreuve d'inhibition accompagnée d'une hyperactivation du cortex prémoteur lorsque la mémoire de travail est sollicitée (Kana et al., 2007). Par ailleurs une connectivité réduite entre le système dit « cingulaire antérieur » et le système fronto-pariétal est mise en évidence (Kana et al., 2007) soulignant l'absence de synchronisation entre ces deux systèmes. En dépit de performances et de circuits centraux pourtant similaires entre les groupes avec et sans autisme, une connectivité réduite a également été retrouvée dans l'autisme entre les régions frontales et pariétales lors d'une épreuve de planification (Just et al., 2007). Cette connectivité fronto-pariétale atypique est, par ailleurs, corrélée à la diminution de la taille du corps calleux observée dans le groupe avec autisme. Dans la mesure où le corps calleux tient un rôle majeur dans la communication corticale inter-hémisphérique, ces données soulignent une probable altération de traitement de l'information.

III. 4. 3. Théorie de l'esprit

Lors des séances d'habiletés sociales développées au sein du service, des scénarios sociaux étaient proposés aux enfants avec autisme. La scène à laquelle j'ai assistée mettait en lumière Antoine et Valentin. Le rôle de Valentin était de pleurer suite à une blessure à la jambe. Le rôle d'Antoine était de consoler Valentin. La consigne était de « consoler son ami » avec des gestes. Alors que le scénario nous paraît commun et que l'étreinte réconfortante semble évidente, la mise en pratique était pour Antoine d'une grande complexité. Antoine restait sur place, incapable de proposer une solution, même oralement. Quand on lui a demandé ce qu'il pouvait faire dans cette situation, il a répondu qu'il ne savait pas.

Scène extraite d'une passation au Centre de Ressources Autisme de Bordeaux. Novembre 2006.

III. 4. 3. 1. La théorie cognitive

Dans cet exemple, ce qui est le plus remarquable est très certainement cette incapacité à comprendre l'état mental d'autrui dans un contexte émotionnel (empathie¹⁰) qui devrait pourtant permettre d'initier une interaction sociale adaptée. Pour les individus qui ont acquis le langage, il est étonnant de mesurer à quel point leur dialogue est unilatéral sans désir apparent d'entretenir un échange et de recevoir l'opinion de la personne à qui ils semblent s'adresser. Dans le tableau clinique qui dépeint les déficits observés dans l'autisme, ce sont véritablement les déficits sociaux et de communication qui déconcertent en premier l'observateur.

La théorie de l'esprit (ou mentalisation) est la capacité à comprendre et à attribuer des états mentaux à autrui ainsi qu'à soi-même (Leslie, 1987; Baron-Cohen, 1991). La première étude qui a interrogé cette aptitude chez des enfants autistes a été conduite par Baron-Cohen (Baron-Cohen et al., 1985). Déclinée sous différentes versions expérimentales, cette épreuve reste une référence de nos jours (Figure 9). Il s'agit de présenter à l'enfant deux poupées nommées Sally et Anne. Sally dispose d'un panier et Anne d'une boîte. Sous les yeux de l'enfant, Sally dépose une balle dans son panier et quitte la pièce. Dès le départ de Sally, Anne récupère la balle du panier pour la déposer dans sa boîte. Sally revient alors dans la pièce pour jouer avec la balle. L'expérimentateur demande à l'enfant « Où Sally va-t-elle chercher sa balle ? ». Pour des enfants de développement typique âgés de 4 ans, la réponse est claire : Sally va chercher là où elle pense avoir déposé sa balle, c'est-à-dire dans son panier. En revanche, 80 % des enfants autistes de même âge mental échouent dans cette épreuve. Selon eux, Sally va chercher la balle là où elle se trouve réellement, sans prendre en compte le fait que Sally ne peut pas le savoir. A titre comparatif, 86 % des enfants atteints du syndrome de Down, et cependant plus déficitaires que les enfants autistes, réussissent cette épreuve.

¹⁰ L'empathie fait référence à la capacité de comprendre l'émotion d'autrui et d'y répondre de façon appropriée (Decety and Meyer, 2008). De fait, l'empathie est une composante de l'attribution d'états mentaux.

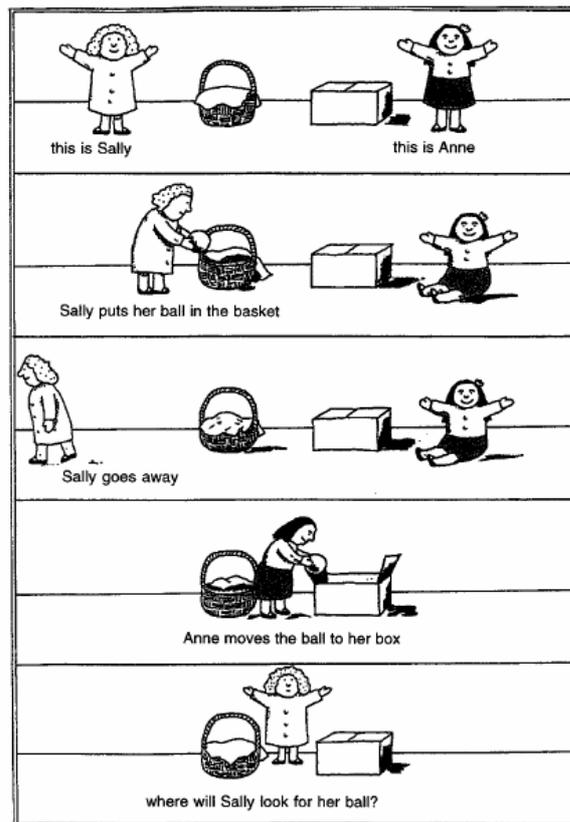


Figure 9 : Illustration de l'histoire de Sally et Anne (Extrait de Frith et Frith, 1999)

Cette étude illustre l'incapacité précoce des personnes avec autisme à accéder intuitivement aux états mentaux d'autrui tels que les croyances, les désirs, les intentions etc. Les récits autobiographiques de personnes atteintes d'autisme de haut niveau ou du syndrome d'Asperger retracent clairement cette difficulté (Grandin, 1999; Williams, 1999). Elles parviennent pourtant à la détourner par l'acquisition d'une mentalisation « théorique », apprise selon des scénarios sociaux typiques. Ainsi ces personnes surmontent ce défaut de mentalisation intuitive en théorisant les conduites sociales qui n'ont, par essence, pas de réelle signification pour elles. Par conséquent, il ne s'agirait pas d'un retard d'acquisition de la théorie de l'esprit puisque les personnes avec autisme sont capables d'acquérir une théorie explicite, leurs difficultés se situeraient davantage dans la dimension intuitive de la mentalisation (Frith, 2004). Nous réduirons la contribution expérimentale à cet exemple tant le corpus dans ce domaine est riche. Néanmoins, les capacités de mentalisation seront plus largement développées dans le contexte de perception sociale que nous aborderons dans la section prochaine.

En dépit d'une mentalisation déficiente pour comprendre autrui, notons néanmoins que les personnes avec autisme sont douées pour « comprendre » les entités inanimées et prédictibles, de façon bien plus performante que la population ordinaire (Lawson et al., 2004). En effet, les personnes avec autisme développent beaucoup d'intérêt pour les machines et les instruments sophistiqués qui requièrent une connaissance technique et méthodique. Cette aptitude trouve un fondement théorique nommé en anglais *the empathising-systemising theory* que nous traduirons par théorie des systèmes (Baron-Cohen, 2002; Lawson et al., 2004; Baron-Cohen, 2006). Cette aptitude s'inscrit dans la triade de compétences, par opposition à la triade de symptômes, dont sont dotées les individus atteints d'autisme (Figure 8).

III. 4. 3. 2. Les corrélats centraux sollicités

Une altération ou un dysfonctionnement des régions cérébrales appartenant au « cerveau social » conduit à cette incapacité à comprendre les aspects élémentaires de la communication. Comme nous l'avons détaillé au chapitre premier, le cerveau social est un réseau cérébral qui regroupe des régions comme le cortex préfrontal médian, la jonction temporo-pariétale, l'amygdale et le STS (Saxe et Powell, 2006; Saxe, 2006; Frith, 2007). Une hypoactivation ainsi qu'une altération de la connectivité fonctionnelle et / ou anatomique ont été mises en évidence dans les études en neuro-imagerie évaluant les mécanismes centraux sous-tendant la théorie de l'esprit chez des patients autistes (Castelli et al., 2002; Vollm et al., 2006; Materna et al., 2008). Le défaut de mentalisation repose sur un déficit neurophysiologique qui explique cette « insensibilité » apparente au monde et aux agents sociaux dans l'autisme.

Nous ne développerons pas davantage l'apport de la neuro-imagerie dans cette section puisque la contribution expérimentale dans ce domaine sera plus amplement détaillée dans la section dédiée à la perception sociale (section III.5).

😊 En quelques lignes...

Pour comprendre les symptômes comportementaux qui définissent l'autisme, un corpus théorique tente de rattacher ces conduites singulières à des déficits cognitifs précis. Chaque théorie, qu'elle renseigne sur la faible cohérence centrale, les dysfonctions exécutives ou le défaut de mentalisation, apporte une explication supplémentaire à cette pathologie. Ces théories ouvrent le champ des possibles en matière de protocoles expérimentaux visant à identifier les substrats neurophysiologiques responsables des comportements autistiques.

III. 5. La perception sociale dans l'autisme

La cognition sociale reflète les mécanismes qui dotent l'être humain de cette formidable capacité à percevoir, catégoriser, analyser, raisonner et s'adapter à ses congénères. La perception sociale est le premier niveau d'accès à cette compétence. C'est l'étape qui permet à l'être humain de décrypter l'expression faciale, la direction d'un regard, le mouvement des mains et, pour ce qui nous préoccupe plus particulièrement dans ce travail de thèse, l'expression du corps en mouvement. De ces informations dynamiques, l'être humain peut extraire le but et l'intention des actions qu'il observe. Cette évaluation lui permet ainsi de comprendre le monde dans lequel il évolue, en particulier les individus.

Dans une pathologie comme l'autisme, ce premier niveau d'accès au monde social ne semble pas suivre les règles de fonctionnement habituelles. De nombreuses investigations tentent d'établir et de cerner les processus intermédiaires qui conduisent à ce dysfonctionnement. Est-ce le traitement visuel qui est altéré ? Est-ce l'information sociale qui est mal interprétée ? Serait-ce la conséquence d'anomalies anatomo-fonctionnelles en cascade?

III. 5. 1. Perception visuelle du mouvement

Dans la littérature la question de l'intégrité des processus visuels dans l'autisme reste entière. S'il a été montré que les individus avec autisme réussissent à détecter des informations locales avec des performances équivalentes voire supérieures à des personnes non-autistes (Shah et Frith, 1993), il a été également mis en évidence que ces personnes étaient capables de traiter l'information globale (Plaisted et al., 2003; Mottron et al., 2003). A

l'hypothèse initiale d'un déficit du traitement global est venue s'ajouter l'hypothèse d'une « préférence » pour le traitement local plutôt qu'un déficit relatif aux processus globaux.

Qu'en est-il de l'intégration de l'information visuelle dynamique ? Des études chez l'enfant avec autisme ont montré une hypo-réactivité posturale inadaptée à la perception d'un mouvement dans leur environnement, contrairement aux comportements posturaux des enfants de développement typique (Gepner et al., 1995; Gepner, 2001; Gepner et Mestre, 2002). De plus, les enfants autistes présentent des seuils plus élevés pour détecter du mouvement global cohérent : ils ont besoin de 10 % d'information locale supplémentaire par rapport aux enfants non-autistes (Spencer et al., 2000; Milne et al., 2002). Ces travaux sont en faveur d'un déficit des processus visuo-perceptifs liés à la voie dorsale.

Pourtant, les individus avec autisme identifient la direction d'un mouvement de façon équivalente aux individus non-autistes lorsqu'il s'agit d'un mouvement simple (de type luminance) qui sollicite les régions visuelles primaires (V1). En revanche, ils sont en difficulté s'il s'agit d'un mouvement plus complexe qui sollicite les régions de la voie dorsale (Bertone et al., 2003). Ces travaux n'incriminent pas directement la voie dorsale mais soulignent une altération dans les processus d'intégration visuelle du mouvement complexe (Bertone et al., 2003; Pellicano et al., 2005 ; Pellicano et Gibson, 2008). Dans l'autisme, le traitement visuel de l'information dynamique ne serait pas déficient, il s'agirait plutôt d'un déficit d'intégration visuelle (Dakin et Frith, 2005). L'étape visuo-perceptive ne serait pas altérée mais l'intégration des différentes informations visuelles en une représentation globale serait mise en péril.

Une récente étude a d'ailleurs mis en évidence chez des adultes autistes une hypoactivation du STS durant l'observation de points dynamiques dans l'espace par rapport à une condition de repos (Freitag et al., 2008). Comme nous l'avons mentionné au chapitre second, le STS est une région polysensorielle qui intègre les informations provenant à la fois de la voie ventrale et de la voie dorsale. Par ailleurs, des anomalies anatomo-fonctionnelles de cette région ont souvent été mises en évidence dans l'autisme (Boddaert et al., 2004 ; Pelphrey et al., 2005 ; Zilbovicius et al., 2006). Il a notamment été souligné que l'hypoactivation de cette région est d'autant plus importante que les déficits sociaux sont marqués chez ces patients autistes (Freitag et al., 2008).

III. 5. 2. Reconnaissance du mouvement « social »

La littérature sur la perception du mouvement dans l'autisme montre que les difficultés rencontrées dans le traitement du mouvement global relèvent plutôt d'un déficit dans les processus d'intégration de l'information visuelle (Dakin et Frith, 2005). Ce constat interroge davantage sur les mécanismes mis en jeu dans l'autisme pour restituer une forme humaine à partir de points lumineux dynamiques. Par ailleurs, le STS, région clé dans cette intégration visuelle du mouvement, joue également un rôle dans la perception sociale (Zilbovicius et al., 2006 ; Pelphrey et Carter, 2008 ; Redcay, 2008).

Dans le cadre de ce travail de thèse, nous avons choisi d'aborder les travaux relatifs à la perception du mouvement du corps dans l'autisme. Le corps en mouvement véhicule des informations sociales importantes. Par la gestuelle, la communication non-verbale met en relief la communication verbale. Concernant les expressions faciales dynamiques et émotionnelles, la difficulté à reconnaître l'émotion chez des personnes autistes est en partie contournée ou tout du moins améliorée si le visage est présenté en mouvement ralenti (Tardif et al., 2007). Ce travail souligne l'importance de l'aspect dynamique dans la perception sociale des individus atteints d'autisme. Bien que passionnante, nous n'explorerons pas cette littérature pour mieux nous consacrer à l'état de l'art réservé à la perception du langage corporel. Par conséquent, seules les études sur le corps entier seront présentées dans cette section.

III. 5. 2. 1. Identification du mouvement humain

Le modèle du mouvement humain (MH) présenté en points lumineux animés (Johansson, 1973) combine à la fois des informations locales (points) et globales (forme humaine). C'est également un formidable outil qui, à partir de la seule information cinématique, permet de mettre en images une richesse d'actions, avec une précision parfois subtile, sans parasitage avec d'autres informations visuelles. Cette précision est essentielle dans l'autisme quand on connaît les déficits que ces individus rencontrent notamment dans le traitement des visages et du regard (Pelphrey et al., 2005; Jemel et al., 2006; Tardif et al., 2007; Hernandez et al., 2009). De fait, ce modèle offre de multiples possibilités d'investigation dans l'autisme : 1- Un déficit du traitement visuel global altèrerait-il l'intégration de points lumineux contenus dans un MH ? 2- Quelles sont les capacités des

personnes autistes à détecter un MH ? Peuvent-elles reconnaître des actions différentes ? 3- Ces capacités varient-elles en fonction de la trajectoire développementale ?

Une enfant âgée de 15 mois et atteinte d'autisme a été évaluée dans une épreuve de préférence visuelle pour le MH (Klin et Jones, 2008). Il s'agissait de montrer des animations de MH présentées à l'endroit ou à l'envers. Le temps de fixation montre que le bébé avec autisme n'accorde pas plus d'importance au MH cohérent qu'au MH inversé. Pourtant comme nous l'avons décrit dans le chapitre second, les nouveau-nés au développement typique ont une préférence visuelle innée pour le mouvement biologique qui est, de surcroît, orientation dépendante. C'est d'ailleurs ce que confirment les résultats obtenus dans cette étude, chez deux bébés de développement typique : ils passent plus de temps à regarder le MH à l'endroit que le MH inversé (Klin et Jones, 2008).

En revanche, si l'animation du MH est couplée à une bande sonore correspondant au type de MH (comme le mouvement d'applaudir accompagné du son) alors le bébé avec autisme fixe de façon significative le MH à l'endroit. Ces résultats suggèrent que le bébé est sensible au couplage synchrone entre l'action qu'il observe et le son qu'il entend. Néanmoins, lorsqu'une vidéo d'une personne chantant une comptine est proposée, le bébé avec autisme fixe préférentiellement des parties du visage (bouche) à faible valeur sociale ; les bébés de développement typique fixant plutôt les yeux, région à forte valeur sociale.

Cette étude de cas montre que la perception du MH est peut-être perturbée très tôt au cours du développement chez les enfants avec autisme. Elle fait également le constat que le traitement visuel est performant lorsqu'il s'agit d'événements à caractères physiques plutôt que sociaux (Klin et Jones, 2008).

Les études comportementales abordant cette question chez l'enfant autiste plus âgé ont montré des résultats divergents : pour certains auteurs, la perception du MH est altérée (Blake et al., 2003), pour d'autres elle est préservée et semblable à celle des enfants de développement typique (Parron et al., 2008; Moore et al. 1997). La méthodologie utilisée explique en partie ces différentes conclusions. Dans l'étude de Blake et collaborateurs, il s'agit d'une tâche de discrimination entre du MH et du mouvement aléatoire, où l'enfant doit répondre à la question « Est-ce une personne ou pas ? ». Les animations durent 1 s et sont présentées sur 50 essais (Blake et al., 2003). Dans les deux autres études, il s'agit d'une tâche d'identification où l'enfant doit décrire (sans contrainte de temps) ce qu'il a vu dans une animation de 5 s (Parron et al., 2008; Moore et al. 1997). La charge attentionnelle (50 essais,

1 s) est plus conséquente dans l'étude de Blake et collaborateurs que dans les deux autres études, ce qui pourrait en partie entraver les performances des enfants autistes (Blake et al., 2003). Par ailleurs, on peut s'interroger sur les compétences langagières de ces enfants (Tager-Flusberg, 2006) en lien avec une réponse descriptive précise relative à la nature des MH. Celles-ci n'ont pas été complètement explorées dans les études de Moore et collaborateurs et de Parron et collaborateurs (Moore et al. 1997 ; Parron et al., 2008). Cette difficulté est partiellement détournée par la présentation restreinte du nombre d'essais (25 essais, 5 s).

Bien que la perception du MH reste intacte dans certaines conditions expérimentales (Moore et al., 1997), il existe cependant une différence de performance entre les deux groupes d'enfants avec et sans autisme (Parron et al., 2008; Moore et al. 1997). Les enfants autistes rencontrent des difficultés non pas dans la perception du MH *per se*, mais plutôt dans l'interprétation de la signification de l'action observée. En effet, ils reconnaissent des MH effectuant des actions quotidiennes mais échouent s'il s'agit de MH exprimant des émotions (Parron et al., 2008; Moore et al. 1997). Ces résultats pourraient questionner sur un possible effet de l'âge dans la capacité à reconnaître du MH « émotionnel ». Or les conclusions sont identiques chez des adultes autistes (Hubert et al., 2007)

Si la perception du MH n'est réellement perturbée que lorsque la durée d'exposition est brève (Moore et al., 1997) et probablement parce que la demande attentionnelle est trop importante (Hubert et al., 2007), alors ces données expérimentales tendent à invalider l'hypothèse d'une altération des processus visuels globaux : la présentation minimaliste du MH n'entraverait pas les compétences d'extraction, à partir des points lumineux, d'une forme humaine globale chez des sujets atteints d'autisme. Pourtant, une récente étude en imagerie fonctionnelle a mis en évidence chez des adultes autistes un dysfonctionnement des mécanismes centraux mis en jeu dans la perception du MH, par rapport aux adultes non-autistes (Freitag et al., 2008). En effet, les auteurs ont montré dans l'autisme, des hypoactivations du réseau fronto-pariétal et du gyrus temporal médian droit, proche du STS dans la perception du MH par rapport à du mouvement aléatoire (Freitag et al., 2008). Les auteurs ont également mis en évidence que plus les patients sont déficitaires dans la sphère sociale, moins l'activité du STS est importante. Au-delà de la perception du MH, ces régions cérébrales sont recrutées chez des adultes de développement typique dans l'observation d'une action (Puce et Perrett, 2003; Rizzolatti et Craighero, 2004; Blake et Shiffrar, 2007).

III. 5. 2. 2. Observation de l'action

L'information minimaliste apportée par des points en mouvement identifiables par des individus autistes permet de reconnaître du MH. L'observation de mouvements d'une simple marche, ainsi modélisés, sollicite plus faiblement des régions cérébrales par rapport à la population contrôle (Freitag et al., 2008). Qu'en est-il lorsque le MH se décline en diverses actions dirigées vers un but ? Quelles sont les régions cérébrales recrutées dans l'observation de telles actions ?

Des études ont exploré les corrélats centraux sous-tendant la perception d'actions présentées en vidéo. Les travaux d'Oberman et collaborateurs proposaient à des adultes avec autisme de visualiser des actions manuelles puis de les réaliser (Oberman et al., 2005). L'activité corticale était mesurée au moyen d'enregistrements encéphalographiques (EEG). Chez des adultes de développement typique, ces travaux ont montré une réduction du rythme *mu* pendant l'observation et l'exécution de l'action reflétant l'activité du mécanisme miroir. En revanche, une absence de cette réduction est observée chez des adultes autistes observant une action manuelle, ce qui suggère un dysfonctionnement du mécanisme miroir (Oberman et al., 2005).

L'étude de Martineau et collaborateurs a interrogé les circuits centraux impliqués dans l'observation d'actions chez des enfants atteints d'autisme (Martineau et al., 2008). Il s'agissait de présenter des vidéos illustrant des scènes de paysages statiques et dynamiques ainsi que des mouvements réalisés par une actrice. L'activité corticale a été mesurée en EEG durant l'observation de ces différentes séquences. La perception de mouvements humains en vidéo se traduit par une désynchronisation de l'activité corticale située dans les régions temporales postérieures et fronto-pariétales chez les enfants de développement typique alors qu'elle est absente chez les enfants autistes. Les résultats montrent par ailleurs une inversion hémisphérique à droite associée à une plus forte activité des régions postérieures telles que la région centro-pariétale et la région occipito-temporale dans l'autisme (Martineau et al., 2008). La région occipito-temporale reflète l'analyse visuelle spécifique des informations liées au mouvement (voie dorsale). En dépit d'un traitement de l'information visuelle dynamique performant, les résultats montrent un dysfonctionnement du réseau fronto-pariétal dans l'autisme.

L'ensemble de ces travaux souligne qu'il existerait dans l'autisme un dysfonctionnement dans l'observation d'une action sous-tendue par le mécanisme miroir particulièrement impliqué dans la compréhension d'une action intentionnelle.

III. 5. 2. 3. Attribution de l'intention

Observer un mouvement humain, c'est aussi comprendre l'action que réalise cet être humain. Cette action est accompagnée le plus souvent par une intention : l'être humain est animé par un but qui le conduit à agir de façon intentionnelle. La perception du mouvement humain, quel qu'en soit son mode de présentation (points lumineux animés ou vidéos), sollicite des régions consacrées à la compréhension d'une action. Ces régions sont particulièrement atteintes d'un point de vue fonctionnel dans l'autisme. Dans le chapitre premier, nous avons également démontré que d'un mouvement non-humain pouvait naître une intention perçue par des individus de développement typique et sous-tendant le réseau de la mentalisation (Castelli et al., 2000). Les personnes avec autisme parviennent-elles à attribuer une intention à partir de mouvements ? Qu'advient-il des réseaux cérébraux recrutés, sont-ils semblables à ceux d'individus de développement typique ?

Castelli et collaborateurs ont proposé à des adultes atteints d'autisme des animations minimalistes illustrant des formes géométriques dynamiques perçues comme interagissant ensemble ou non. Bien que l'activité dans les régions visuelles soit similaire à celle obtenue dans le groupe contrôle, les résultats traduisent cependant une hypoactivation du réseau de la mentalisation dans le groupe d'adultes autistes. Dans un premier temps, ces résultats montrent que le traitement visuel primaire est préservé dans l'autisme. En revanche, l'intégration visuelle est probablement altérée puisqu'une connectivité fonctionnelle réduite a été mise en évidence entre les aires visuelles (cortex extrastrié) et le sillon temporal supérieur (Castelli et al., 2002). Ces résultats sont également à rapprocher des données comportementales qui montrent que les adultes avec autisme décrivent de façon moins précise les animations qui interagissent de manière intentionnelle par rapport aux animations neutres ou dirigées vers un but. Par conséquent, ces données expérimentales montrent un dysfonctionnement du réseau de la mentalisation dans l'autisme qui expliquerait le défaut de théorie de l'esprit caractéristique de cette pathologie.

III. 5. 3. Implication du mécanisme miroir ?

La somme de ces arguments expérimentaux rapporte des dysfonctionnements dans l'autisme relatifs aux mécanismes centraux impliqués dans la compréhension d'une action mais également dans la composante intentionnelle de l'action. Par ailleurs, des anomalies anatomiques ont été observées chez des patients atteints d'autisme dans des régions appartenant au mécanisme miroir (Hadjikhani et al., 2006). Ces altérations anatomo-fonctionnelles du mécanisme miroir pourraient rendre compte des déficits observés dans l'autisme. Les difficultés dans les comportements sociaux pourraient résulter de dysfonctionnements du mécanisme miroir (Williams et al., 2001; Fecteau et al., 2006; Gallese, 2006; Oberman et Ramachandran, 2007). En effet, comme nous l'avons montré dans le chapitre premier, le mécanisme miroir est impliqué dans la compréhension d'une action intentionnelle réalisée par autrui (Rizzolatti et Craighero, 2004; Iacoboni et al., 2005; Rizzolatti et Fabbri-Destro, 2008). Par conséquent, si ce réseau est inopérant, les personnes autistes doivent *a fortiori* rencontrer des difficultés à établir des relations sociales avec les individus. Dans le cadre de ce travail de thèse, nous avons tenté d'interroger la contribution du mécanisme miroir à la reconnaissance de scènes sociales dans l'autisme.

MATERIEL ET METHODES

I. LES ANIMATIONS EN POINTS LUMINEUX

Pour explorer la cognition sociale, les premiers items proposés dans des études comportementales étaient habituellement des images statiques (bande-dessinée ou photographie) ou bien des histoires orales, mettant en scène des personnages. Avec l'essor de l'informatique, de nouveaux outils ont vu le jour comme les animations dynamiques sous des formes géométriques ou de vidéos (Castelli et al., 2000; Iacoboni et al., 2004) ou encore les environnements virtuels (Pelphrey et al., 2004; Klinger et al., 2005). L'ensemble de ces stimuli, qu'ils soient statiques ou dynamiques, présentent une quantité massive d'informations à la fois visuelles (expressions du visage, environnement extérieur, physionomie des personnages etc.) ou auditives (contenu sémantique du langage, intonation vocale et prosodie etc.).

Le choix que nous avons fait d'utiliser des animations en points lumineux réside justement dans l'aspect « épuré », et par conséquent simplifié, de ce type de stimuli qui ne donne que l'information cinématique apportée par le corps en mouvement. Aborder la reconnaissance des interactions sociales sous l'angle de la motricité avait pour but de souligner le rôle de la communication non-verbale dans les relations interindividuelles. Par ailleurs, ce modèle semble pertinent chez des patients atteints d'autisme puisque ce type d'animations véhicule le contenu social qu'au moyen du mouvement, sans autres indices visuels. Or, comme nous l'avons précisé dans le cadre théorique, les personnes autistes présentent d'importantes difficultés dans l'intégration des informations visuelles ce qui peut conduire à des déficits dans la compréhension de scènes sociales. Ainsi ce modèle en points lumineux limite le flux d'information et pourrait permettre aux personnes avec autisme de reconnaître des interactions sociales grâce au seul mouvement.

I. 1. Les différents types d'animations

I. 1. 1. Elaboration des animations

Le modèle des points lumineux présente des avantages évidents tels que la possibilité de manipuler et contrôler les stimuli mais encore le fait de restreindre l'information à sa seule composante motrice. L'inconvénient majeur réside dans la complexité pour construire ces

animations. En effet, différentes techniques permettent d'élaborer des mouvements humains : retracer les articulations à partir de photographies ou de films, produire des animations de synthèse sur ordinateur ou utiliser un algorithme, développé par Cutting et collaborateurs, qui génère un marche « synthétique » (Cutting et al., 1978). Notre choix s'est porté sur l'utilisation d'un système d'analyse du mouvement qui offre la possibilité d'enregistrer de « vrais » individus en situations réelles d'interaction sociale.

Nous avons élaboré des animations silencieuses en points lumineux animés (de l'anglais *point-light display*), présentant deux acteurs réels selon le modèle de Johansson (Johansson, 1973). Ces animations sont représentées par des points lumineux blancs sur fond noir. L'acquisition de ces stimuli visuels a été rendue possible grâce au système d'analyse du mouvement SMART© (BTS Bioengineering) qui a permis d'enregistrer le déplacement de 20 marqueurs (15 mm de diamètre) positionnés sur le corps de chaque acteur (20 marqueurs / acteur), à une fréquence de 120 Hz, soit 120 images / s. Les animations ont été finalisées avec le logiciel de capture et de montage vidéo VirtualDub©. Les animations illustrent deux acteurs engagés dans une scène sociale (en interaction sociale, IS) (Figure 10a) ou dans des mouvements neutres côte à côte (non interaction sociale, NIS) (Figure 10b). La présentation des animations ainsi que l'enregistrement des réponses ont été générés par un programme informatique écrit avec le logiciel de développement LabVIEW© version 7.1.

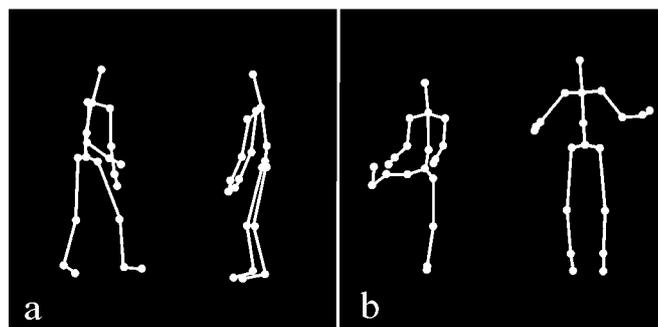


Figure 10 : Images extraites des animations illustrant une scène avec interaction sociale (a) et sans interaction sociale (b). Ces animations sont présentées en « sticks » : les points lumineux sont reliés par des traits. Nous avons également proposé le mode de présentation en points non reliés (voir dans le texte)

I. 1. 2. Les interactions sociales (IS)

Les IS représentent une scène dynamique dans laquelle l'action initiée par un acteur induit la réaction du second acteur dans un contexte social cohérent. Ce principe action / réaction propose des indices qui permettent au second acteur de réagir de façon appropriée à l'action qu'il vient d'observer. Notre objectif était de représenter des scènes sociales au plus près de situations quotidiennes, c'est-à-dire des situations naturelles et écologiques. Nous avons ainsi abordé une gamme élargie d'IS allant des conventions sociales (comme l'employeur qui propose au candidat de s'asseoir) aux situations émotionnelles de valences positive et négative (telle qu'une personne en pleurs qui est consolée par un ami) en passant par les jeux / sports collectifs (comme deux co-équipiers jouant au football). Des objets ont parfois servi à la mise en place d'une IS (ballon, épée ou chaise) mais ces objets étaient invisibles dans l'animation en points lumineux. Au total, nous avons scénarisé 20 types de scènes sociales qui ont été dupliquées en fonction de l'acteur qui initiait l'action (acteur A ou acteur B) mais aussi en déclinant différents angles de vue comme nous le détaillerons ci-après. Nous avons listé ces stimuli dans le Tableau 2. Chaque animation durait 3 s.

Code	Conventions sociales	Code	Situations émotionnelles	Code	Jeux / sports collectifs
IS1	Se serrer la main	IS2	Se faire gronder	IS4	Jouer au football
IS9	Proposer à quelqu'un de s'asseoir	IS3	Partager sa joie	IS6	Jeux de mains enfantins
IS10	Agiter les mains pour se dire « au revoir »	IS5	Pleurer et se faire consoler	IS7	Danser la valse
IS14	Faire la révérence	IS11	Etre heureux de se retrouver	IS8	Faire de l'escrime
IS15	Etre rattrapé lors d'une chute	IS12	Faire peur à l'autre	IS16	Se saluer comme au judo
IS17	Montrer quelque chose en haut	IS13	Se faire renvoyer		
IS18	Montrer quelque chose en bas	IS19	Interpeller pour dire un secret		
IS20	Se faire la bise				

Tableau 2 : Liste des 20 scènes sociales illustrant les interactions sociales présentées dans nos études associées à leur code.

I. 1. 3. Les non-interactions sociales (NIS)

La condition NIS illustre deux acteurs qui réalisent des mouvements neutres indépendamment l'un de l'autre. Les mouvements sont sans signification particulière, non-dirigés vers un but et sans intention de communication. Ces scènes sont composées de mouvements de lever et de balancement de bras et / ou de jambes, de rotation de tronc, de déplacement d'avant en arrière ou de gauche à droite etc. Chaque acteur a été enregistré séparément de l'autre acteur. Nous avons ensuite juxtaposé « artificiellement » les deux animations individuelles lors du montage vidéo. Ce soin a été pris pour éviter, particulièrement, tout effet de synchronie dans les mouvements réalisés par les personnages. En effet, une récente étude a exploré comment la présence d'une tierce personne marchant à côté d'une autre modifiait le rythme des pas conduisant à une synchronisation des mouvements (Zivotofsky et Hausdorff, 2007). Pour interpréter correctement les résultats, il était fondamental que les sujets participants aux études ne perçoivent aucune interaction entre les deux personnages. Chaque animation durait également 3 s.

I. 1. 4. Différentes perspectives et angles de vue des IS et NIS

L'élaboration des animations devait répondre à deux exigences imposées¹¹ par la technique de l'IRMf. Tout d'abord, nous devons créer un maximum de stimuli visuels afin d'obtenir une puissance statistique suffisante, liée au choix du paradigme expérimental (protocole événementiel ; nombre d'essais / session d'acquisition) sans pour autant répéter plusieurs fois le même stimulus. De plus, les stimuli visuels devaient être à la fois suffisamment distincts dans la valeur sociale ou non sociale véhiculée, mais également comparables en terme d'informations visuelles et cinématiques. En effet, comme nous allons le voir dans la section sur l'IRMf, les activations cérébrales obtenues après analyses statistiques sont le résultat de comparaison entre deux conditions expérimentales appelées « contraste ». L'élaboration de nos stimuli a tenu compte de ces deux exigences.

Nous utilisons le terme de perspective pour décrire la position des personnages l'un par rapport à l'autre et le terme d'angle de vue pour décrire l'angle sous lequel le sujet participant à l'étude observe les deux acteurs présents dans l'animation. Ainsi dans la condition IS, deux perspectives sont proposées : soit un acteur présente son profil à l'autre

¹¹ Ces exigences seront développées dans la partie consacrée à la technique d'IRMf

acteur, soit les acteurs sont « face à face ». L'angle de vue sous lequel le sujet observe les animations présente les acteurs soit tous deux de profil, soit un acteur face à l'observateur alors que le second acteur lui tourne le dos.

En revanche dans la condition NIS, la perspective « face à face » n'est jamais proposée pour éviter toute ambiguïté. Néanmoins, la perspective du personnage présentant son profil à l'autre, similaire à la perspective proposée dans la condition IS, est conservée. Une nouvelle perspective est proposée celle des personnages présentés « côte à côte ». Concernant l'angle de vue de l'observateur, nous avons pris soin d'éliminer ceux qui étaient ambigus. Le sujet visualise les personnages tous deux faces à lui, un acteur face à lui alors que le second acteur lui tourne le dos ou encore les personnages tous deux de trois quart, orientés dans la même direction (l'un tournant le dos à l'autre).

I. 1. 5. Deux modes de présentation du MH

Nous avons choisi de présenter les animations selon deux modalités distinctes : le mode en points lumineux, comme précédemment décrit d'après Johansson (Johansson, 1973) et le mode en « *sticks* » qui consiste à relier les points un à un par des traits ce qui résulte en une forme humaine plus reconstruite. Cette présentation en sticks a parfois été utilisée dans la littérature, notamment dans des études sur la perception du mouvement humain (MH) (Shiffrar et al., 1997; Hodgins JK et al., 1998; Giese et al., 2008).

Nous avons fait ce choix méthodologique pour répondre à des questions concernant l'autisme. En effet, comme nous l'avons abordé dans le cadre théorique, les patients avec autisme présentent de meilleures performances dans le traitement des informations locales au détriment des informations globales. Le terme de faiblesse de la cohérence centrale est souvent employé à cet égard comme l'une des théories cognitives expliquant les déficits rencontrés dans cette pathologie (Happe et Frith, 1996). Par conséquent, la présentation en points lumineux pourrait accentuer cette focalisation sur le détail (points) au détriment de la forme globale (forme humaine). C'est pourquoi nous avons émis l'hypothèse qu'une présentation en sticks pourrait faciliter la reconnaissance du MH et, *a fortiori*, la reconnaissance des interactions sociales.

I. 1. 6. Situation contrôle de l'étude chez l'enfant avec autisme

Dans l'étude comportementale adaptée aux enfants autistes, il semblait nécessaire de tester en premier la perception du MH, compte tenu des controverses rapportées dans la littérature (Moore et al. 1997; Blake et al., 2003; Hubert et al., 2007; Parron et al., 2008). Cette condition contrôle présentait soit un seul acteur réalisant des mouvements neutres, soit des mouvements aléatoires « non-humains » (de l'anglais, *scrambled motion*) c'est-à-dire des points désorganisés dans l'espace (Figure 11). Plus précisément, les mouvements humains étaient similaires à ceux réalisés par les acteurs de la condition NIS, avant le montage vidéo pour les juxtaposer. Les mouvements aléatoires étaient composés de 18 marqueurs attachés à des supports souples en mouvements. Ces deux types d'animations sont des conditions de référence dans les études sur le mouvement humain en point lumineux animés selon le modèle princeps (Johansson, 1973). Chaque animation durait 3 s.

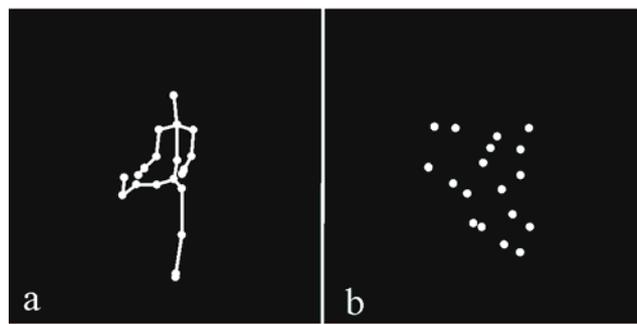


Figure 11 : Images extraites des animations illustrant un mouvement humain simple (a) et du mouvement aléatoire (b).

I. 2. Etudes préliminaires exploratoires

Afin de valider les animations en points lumineux animés, nous avons mis au point des études exploratoires qui avaient pour objectifs, d'une part de rendre l'expérience « réalisable » en termes de compréhension de la consigne et de durée de passation pour de jeunes enfants, et d'autre part de sélectionner les stimuli visuels en fonction du contenu social ou non social (les sujets, adultes et enfants les plus âgés, devaient pouvoir classer les items en deux catégories sans ambiguïté). Enfin une étude chez des sujets adultes a permis d'évaluer l'intensité émotionnelle des items sociaux.

I. 2. 1. Validation des stimuli visuels

I. 2. 1. 1. Protocole expérimental

L'ensemble des études comportementales a été réalisé au moyen d'un ordinateur portable. La version initiale du protocole a été testée sur une population de dix adultes âgés de 23 à 36 ans (moyenne d'âge : 28,9 ans \pm 3,11 ans ; 5 femmes, 5 hommes) et de huit enfants âgés de 7 à 8 ans (moyenne d'âge : 8,4 ans \pm 8 mois ; 6 filles, 2 garçons), tous novices à la présentation des IS en points lumineux animés. Quatre sessions ont été présentées aux adultes (durée totale de 22 min) tandis que les enfants ne réalisaient que deux sessions (durée totale de 11 min). Chaque session « adultes » comportait 24 IS et 24 NIS. Au total, 192 animations (IS et NIS) ont été visualisées par les adultes. Les sessions « enfants » comportaient chacune 16 IS et 16 NIS pour un total de 64 animations (IS et NIS) visualisées par les enfants. Dans chaque catégorie, les deux modes de présentation (points et sticks) ont été proposés : la moitié des animations était présentée en points et l'autre moitié en sticks. Par ailleurs, différents angles de vue et perspectives ont été testés pour permettre d'accroître le nombre d'items à proposer dans les expériences notamment en imagerie cérébrale fonctionnelle.

Le protocole expérimental consistait à répondre à la question-consigne « Les deux personnes font-elles ensemble ou chacune de leur côté ? » lors de l'observation des animations qui duraient 3 s. Une séance de mimes et une session d'entraînement sur l'ordinateur permettaient aux enfants de comprendre ce que nous entendions par « faire ensemble » et « chacun de son côté ». Une image de réponse apparaissait à l'écran matérialisant le code couleur attribué à chacune des conditions : le rouge à gauche indiquant la condition NIS (« chacun de son côté ») et le vert à droite pour la condition IS (« faire ensemble »). Ce code couleur était également reproduit sur deux touches du clavier pour répondre. Les sujets devaient catégoriser au moment où apparaissait l'image de réponse. La consigne ne reposait pas sur une exigence de rapidité. Le pourcentage de réponses correctes ou incorrectes a été le paramètre utilisé pour évaluer cette première étude.

I. 2. 1. 2. Bilan

A l'issue de cette étude exploratoire, nous avons mis en évidence des animations pour lesquelles les adultes et les enfants rencontraient des difficultés. Nous avons par conséquent choisi d'éliminer les animations pour lesquelles un pourcentage de réponses correctes

inférieur à 90 % était attribué par le groupe d'adultes (le taux de réponses correctes étant inférieur dans le groupe d'enfants). Nous avons également pu constater que certains angles de vue induisaient une ambiguïté pour les sujets tout comme certains stimuli présentés en points ou en sticks. Nous les avons donc supprimés. Cette étude comportementale nous a conduit à conserver au total 112 stimuli (56 par catégorie, dont 28 présentés en points et 28 présentés en sticks). De plus, cette première étude nous a donné l'occasion de tester et valider la consigne et aussi de nous assurer que la durée de l'expérience était bien tolérée par les enfants les plus jeunes.

I. 2. 2. Estimation de l'intensité émotionnelle des IS

I. 2. 2. 1. Protocole expérimental

Cette étude a été mise en place dans le but d'évaluer le contenu émotionnel des animations que nous proposons aux sujets ainsi que l'éventuelle influence de l'orientation spatiale et du mode de présentation sur cette attribution émotionnelle. En effet, les interactions sociales, comme nous l'avons précisé dans la définition, portent une connotation émotionnelle pour certains types de stimuli. Nous souhaitons « quantifier » cette intensité émotionnelle afin d'en mesurer l'éventuel impact dans nos études en imagerie cérébrale fonctionnelle¹². Pour ce faire, nous avons testé 14 adultes âgés de 23 à 30 ans (moyenne d'âge : 26,8 ans \pm 2,4 ans ; 7 femmes, 7 hommes), tous novices à la présentation des IS en points lumineux animés.

Nous leur avons présenté les 56 animations sociales sélectionnées à la suite de l'étude préliminaire, et nous avons réparti ces animations en quatre sessions expérimentales d'une durée totale de huit minutes. Les sujets devaient observer attentivement les animations et leur attribuer verbalement une valeur située sur une échelle de cotation d'intensité émotionnelle allant de 0 à 5 (la valeur 0 signifiant une absence d'émotion tandis que la valeur 5, une forte intensité émotionnelle). Nous avons relevé la cotation attribuée par chaque sujet pour chaque IS. Nous avons ensuite réparti les stimuli en deux groupes : les IS d'intensité faible (cotation de 0 à 2) et d'intensité forte (cotation de 3 à 5).

¹² Le traitement des émotions est sous-tendu par des réseaux centraux connus et définis anatomiquement.

I. 2. 2. 2. Résultats

Les résultats ont été analysés à un niveau quantitatif (répartition des IS en deux groupes selon le degré d'intensité émotionnelle) et à un niveau qualitatif (repérage du type précis d'animation sociale qui présente les plus forts scores émotionnels moyennés sur le groupe de sujets). Les résultats montrent que 49 % des items IS ont été considérés comme faiblement émotionnels contre 51 % considérés comme fortement émotionnels (voir les annexes, pour les détails). Nous avons également mesuré l'influence que pouvaient avoir l'orientation spatiale (angle de vue) et le mode de présentation (sticks et points) sur l'attribution d'intensité émotionnelle. Les résultats montrent que ni l'orientation spatiale ni le mode de présentation n'influencent la cotation en émotion. Par ailleurs, des animations comme « être contents », « pleurer / consoler », « se faire renvoyer » ou encore « valser » ont un score moyen de 4 tandis que les items « proposer à quelqu'un de s'asseoir » ou « montrer quelque chose vers le bas à quelqu'un » ont un score moyen de 1 (voir les annexes, pour les détails). Par conséquent, cette étude nous a permis de quantifier la valeur émotionnelle contenue dans chacune des animations présentées aux sujets (Figure 12). Nous pouvons conclure que l'intensité émotionnelle est graduellement répartie sur les 56 IS visualisées par les sujets.

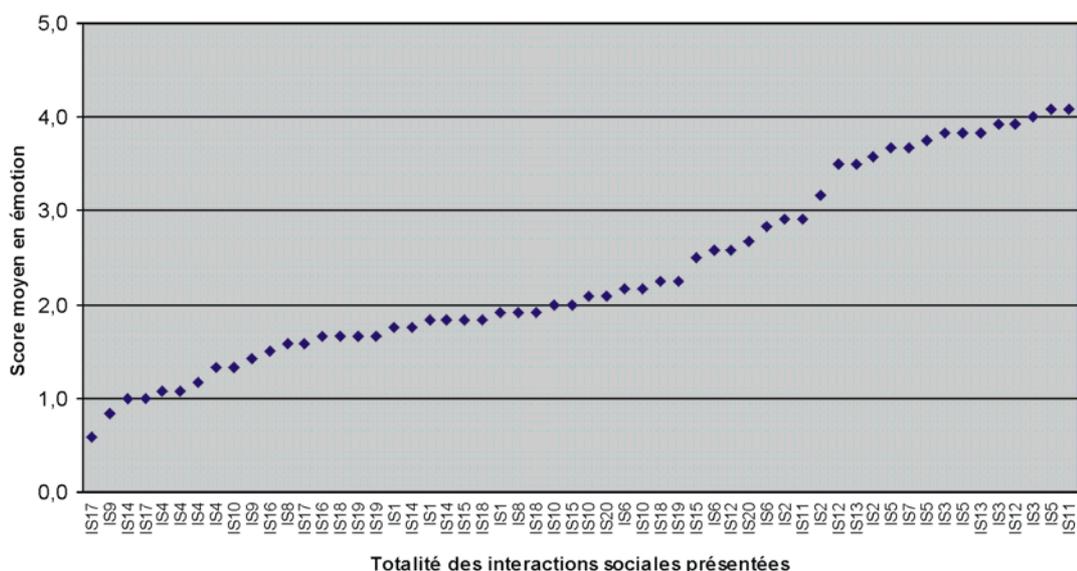


Figure 12 : Répartition des scores d'intensité émotionnelle attribués aux 56 interactions sociales visualisées dans cette étude. Une même interaction sociale peut être dupliquée en fonction de l'acteur qui initie l'action et en fonction des différents angles de vue (répétition du même code en abscisse).

II. GROUPES EXPERIMENTAUX

Les études qui suivent ont été réalisées en conformité avec les lois sur l'expérimentation humaine (loi Huriet) dans des locaux habilités pour les études en IRMf et avec l'accord du comité d'éthique local (Comité de Protection des Personnes en recherche biomédicale, anciennement CCPPRB Marseille 1). Pour chaque étude, les personnes majeures donnaient leur consentement éclairé tandis que pour les enfants, celui des parents était requis. Par ailleurs, nous tenions à ce que chaque enfant donne son accord effectif et accepte de participer activement aux expériences de façon explicite.

II. 1. Etude comportementale en développement typique

Au cours de cette première étude, nous avons enregistré 39 enfants et 12 adultes. Trois enfants âgés de 4 ans et 5 mois (les plus jeunes du groupe 4 / 6 ans) n'ont pas été retenus dans cette étude soit parce qu'ils ont souhaité interrompre l'épreuve, soit parce que leur seuil de réponse était au-dessous du seuil du hasard. En raison de la similarité de l'épreuve comportementale réalisée en IRMf (mêmes essais, même consigne), les données de certains enfants ont été incluses dans l'étude développementale.

Nous avons comparé quatre groupes d'âge :

- 12 enfants de 4 à 6 ans (moyenne d'âge : 5,4 ans \pm 7 mois ; 7 filles, 5 garçons)
- 12 enfants de 7 à 8 ans (moyenne d'âge : 7,10 ans \pm 7 mois ; 6 filles, 6 garçons)
- 12 enfants de 9 à 10 ans (moyenne d'âge : 10,2 ans \pm 8 mois ; 5 filles, 7 garçons)
- 12 adultes de 25 à 33 ans (moyenne d'âge : 29,4 ans \pm 3,3 ans ; 8 femmes, 4 hommes)

Les sujets étaient majoritairement droitiers (excepté deux enfants gauchers dans le groupe des 9 / 10 ans, une enfant gauchère dans le groupe des 7 / 8 ans et une enfant gauchère dans le groupe des 4 / 6 ans). Tous les sujets étaient naïfs à la présentation de ce type de stimuli visuels. Tous les enfants suivaient une scolarité normale.

II. 2. Etudes en imagerie cérébrale fonctionnelle

L'utilisation d'une technique telle que l'IRMf exige de prendre des précautions importantes pour sélectionner les participants. Tous les sujets devaient en effet répondre aux contraintes imposées par l'IRMf en particulier l'absence absolue de port de métal (par

exemples bijou, appareil d'orthodontie, lunettes) et d'appareil de stimulation médicale (par exemples pacemaker, broche chirurgicale). Les sujets avaient une acuité visuelle normale ou corrigée à l'aide de lentilles de contact. Une liste des contre-indications et des précautions d'usage étaient présentées aux parents ainsi qu'à l'enfant avant les sessions d'acquisition.

II. 2. 1. Population adulte

Quatorze adultes âgés de 20 à 41 ans (moyenne d'âge : 29,10 ans, \pm 7,5 ans ; 6 femmes, 8 hommes) ont participé à l'étude en imagerie fonctionnelle. Tous les participants présentaient une acuité visuelle normale ou corrigée et n'avaient aucun antécédent médical, psychiatrique ou neurologique. Tous les sujets utilisaient la souris de l'ordinateur de la main droite.

II. 2. 2. Population enfant

Nous avons enregistré 16 enfants au développement typique de 8 à 11 ans dont 13 (moyenne d'âge : 10 ans, \pm 10 mois ; 7 filles, 6 garçons) ont été retenus pour l'étude après l'étape de correction des mouvements (pour plus de détails, voir les étapes du prétraitement des images en IRMf). Tous les enfants présentaient une acuité visuelle normale et n'avaient aucun antécédent médical ni psychiatrique ou neurologique et suivaient une scolarité normale. Tous les sujets utilisaient la souris de l'ordinateur de la main droite.

II. 3. Etude en développement pathologique

II. 3. 1. Enfants avec autisme

Nous avons enregistré 12 enfants avec autisme (1 fille, 11 garçons) âgés de 6 à 12 ans (moyenne d'âge chronologique : 9,11 ans, \pm 1,11 ans et moyenne d'âge mental : 8,7 ans, \pm 1,9 ans). Ces enfants étaient suivis en consultation au Centre de Ressources Autisme (CRA) de l'Aquitaine dirigé par le Pr. Manuel Bouvard à l'hôpital Charles Perrens de Bordeaux. L'équipe clinique qui compose ce centre est spécialisée dans la pathologie de l'autisme. Une évaluation riche incluant un bilan développemental, psychiatrique, psychologique, orthophonique, psychomoteur et pédiatrique permet de mieux connaître les enfants et de poser le diagnostic d'autisme selon les critères établis par le DSM-IV (*American Psychiatric*

Association, 1994) et la CIM-10 (Classification Internationale des Maladies, 1996). Le Tableau 3 présente les scores obtenus à certains bilans psychologique et orthophonique.

Les critères d'exclusion pour cette étude comprenaient la présence de troubles associés, en particulier de maladies neurologiques congénitales ou acquises d'étiologie identifiée et non spécifique à l'autisme (maladie métabolique, anomalie chromosomique, malformation cérébrale etc.), une médication dont un des effets pouvait affecter les capacités motrices, cognitives et mnésiques ainsi qu'un retard mental important (QI < 60).

	Age réel	Quotient intellectuel					Echelle de comportements socio-adaptatifs					Théorie de l'esprit	
		QIT	ICV	IRP	IMT	IVT	Communication	Autonomie	Socialisation	Motricité	score global	1er ordre	2e ordre
Enfants	années, mois												
aut_1	10,6	59	79	60	64	78	9,6	6,10	5,3	max	7,2	échec	échec
aut_2	6,10	(WPPSI) 87	75	104	/	/	4,4	2,10	2,9	4,4	3,5	échec	échec
aut_3	12,6	83	76	90	115	69	8,5	7,3	5,1	max	4,6	réussite	échec
aut_4	9,9	K-ABC proc. mentaux composites = 104 (IRP)					6,7	5,1	5,5	max	5,6	réussite	échec
aut_5	9,11	(WISC III) 71	63	85	/	/	6,3	5,3	4,5	max	?	réussite	échec
aut_6	11,10	59	75	54	/	/	7,8	5,8	3,3	max	5,7	réussite	réussite
aut_7	9,10	K-ABC proc. mentaux composites = 86 (IRP)					/	/	/	/	/	réussite	échec
aut_8	6,8	104	112	94	/	/	/	/	/	/	/	réussite	réussite
aut_9	8,10	112	126	99	85	90	7,8	5,5	4,1	max	5,7	réussite	échec
aut_10	11,5	94	101	92	91	93	8,5	6,6	3,4	max	6,1	réussite	réussite
aut_11	12,1	48 à 65 67 à 85 83 à 101 66 à 86					/	/	/	/	/	réussite	échec
aut_12	8,10	49	111	67	71		7,4	6,8	5,2	max	6,3	réussite	échec

Tableau 3 : Synthèse des évaluations pour évaluer 1- le quotient intellectuel total (QIT) notamment verbal (ICV, indice de compréhension verbale) et non-verbal (IRP, indice de raisonnement perceptif) avec les échelles de Weschler (WPPSI, WISC III, WISC IV) ou de Kaufman (K-ABC) en fonction de l'âge et du développement des enfants ; 2- les comportements sociaux avec l'échelle de VINELAND exprimée en années et mois ; 3- la théorie de l'esprit de premier ordre avec l'histoire de Sally et Anne (épreuve de changement de lieu) puis de second ordre avec l'histoire du grand-père (épreuve de compréhension des conséquences des émotions). IMT signifie indice de mémoire de travail et IVT indice de vitesse de traitement.

II. 3. 2. Enfants au développement typique

Nous avons enregistré 24 enfants au développement typique appariés en sexe, en âge chronologique et en âge mental aux 12 enfants avec autisme. Les enfants appariés en âge chronologique étaient âgés 6 à 12 ans (moyenne d'âge : 9,11ans, \pm 1,11 ans) et ceux appariés en âge mental étaient âgés de 6 à 11 ans (moyenne d'âge : 8,7 ans, \pm 1,9 ans). Comme précédemment cités, les enfants ne présentaient aucun antécédent médical ni psychiatrique ou neurologique et suivaient une scolarité normale.

III. ETUDES COMPORTEMENTALES SUR LA RECONNAISSANCE DES INTERACTIONS SOCIALES

III. 1. Etude en développement typique

Riches de nos études préliminaires, nous avons finalisé la version du protocole expérimental visant à évaluer la reconnaissance des interactions sociales en points lumineux animés chez des enfants au développement typique. Les animations illustrant les interactions sociales (IS) et les non interactions sociales (NIS) ont été décrites précédemment.

Les passations se déroulaient au domicile des enfants dans une pièce calme pour faciliter la concentration. La séance débutait par la familiarisation avec le matériel et par l'explication de la consigne. Nous adaptions le discours en fonction de l'âge de l'enfant et présentions l'étude d'une façon ludique. Les enfants étaient assis dans un fauteuil, le plus confortablement possible, face à un écran d'ordinateur. Chaque enfant devait observer les animations puis répondre à la question « Les deux personnes font-elles ensemble ou chacune de leur côté ? ». Un code de couleur était matérialisé sur deux touches du clavier : la couleur verte à droite pour IS et la couleur rouge à gauche pour NIS. Après avoir attentivement observé l'animation pendant 3 s, l'enfant la catégorisait en IS ou NIS en appuyant sur une des deux touches selon son choix. Aucune consigne de rapidité n'était précisée, c'est pourquoi nous n'avons pas retenu le temps de réaction (TR) dans cette étude. Un rappel visuel signalait à l'enfant qu'il devait donner une réponse active. Ce renforcement positif avait également pour effet de motiver l'enfant en centrant son attention sur la tâche comportementale. La durée maximale pendant laquelle l'enfant pouvait répondre était de 6 s : 3 s pendant l'animation et 3 s supplémentaires durant l'image de rappel (Figure 13).

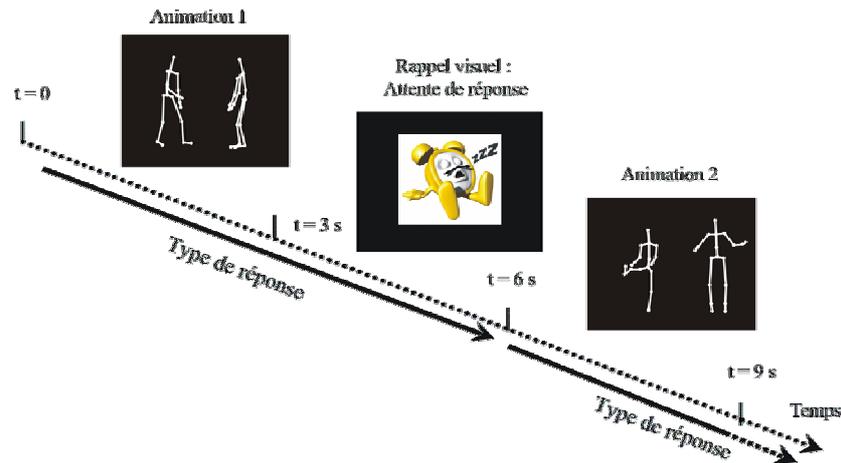


Figure 13 : Déroulé temporel du protocole comportemental de reconnaissance des interactions sociales en développement.

Dans cette version du protocole, l'animation ne s'interrompait pas lorsque l'enfant donnait sa réponse. Nous avons modifié ce point dans l'étude adaptée à l'autisme car il nous semblait important que les enfants se rendent compte que l'animation passait à la suivante lorsqu'ils donnaient leur réponse. Quatre sessions de 3 min étaient effectuées par l'enfant. Au total, 112 stimuli étaient visualisés dont 56 appartenant aux IS et 56 aux NIS. Un essai d'entraînement était proposé à l'enfant pour vérifier que la consigne était correctement comprise. En fin de passation, chaque enfant se voyait décerner le diplôme du « petit observateur de bonhommes » qu'il validait en apposant sa signature. Nous avons enregistré le type de réponse donné par l'enfant afin d'évaluer la performance.

III. 2. Etude adaptée aux enfants avec autisme

III. 2. 1. Protocole expérimental

Sur la base de l'étude en développement typique, nous avons adapté le protocole aux spécificités des enfants avec autisme. De concert avec l'équipe clinique du service de pédopsychiatrie de Bordeaux, nous avons supprimé le code couleur (rouge / vert), modifié le vocabulaire de la consigne expérimentale (« communiquer ») ainsi que complété la tâche de reconnaissance des IS par des tâches contrôles. Notons une modification importante dans la génération du programme informatique qui a permis de stopper l'animation en cours, quelle qu'elle soit, dès que la réponse était donnée. Outre la réduction du temps de passation, cette optimisation a permis à l'enfant de se rendre compte que l'animation passait à la suivante dès

qu'il répondait. D'autre part, ce programme nous permet d'enregistrer le temps de réaction (TR) qui offre un indice supplémentaire pour évaluer la difficulté éventuellement rencontrée par les enfants avec autisme. L'enfant et moi-même étions dans une pièce au calme au Centre de Ressources Autisme (CRA) de l'Aquitaine et la séance débutait par la familiarisation avec le matériel informatique. L'enfant était assis dans un fauteuil, le plus confortablement possible, face à l'écran d'ordinateur. En début de passation, chaque enfant réalisait deux tâches contrôles.

III. 2. 1. 1. Epreuve visuo-motrice simple

La première tâche contrôle visait à mesurer le TR de l'enfant pour appuyer sur une touche du clavier dès qu'une croix de fixation apparaissait à l'écran. Il s'agit d'une association entre la perception d'un stimulus visuel simple et une réponse motrice. L'enfant devait appuyer le plus vite possible sur la touche indiquée dès l'apparition de l'image. La consigne était « Dès qu'une croix apparaît sur l'écran, tu cliques le plus vite possible sur le bouton » (Figure 14). Nous avons testé l'effet de la latéralité sur le TR dans la mesure où les touches de réponse étaient fixes d'une session à l'autre (à droite pour la catégorie IS et à gauche pour la catégorie NIS). Sur quatre sessions constituées de huit essais chacune, nous avons alterné main droite / main gauche.

III. 2. 1. 2. Epreuve de perception du mouvement humain

La seconde tâche contrôle avait pour objectif de tester la perception du mouvement humain (MH) par rapport à du mouvement aléatoire. En effet dans la littérature, la question de la perception du MH en points lumineux chez des personnes avec autisme reste encore confuse. Certains auteurs ont montré des déficits de perception du MH (Blake et al., 2003) tandis que d'autres auteurs, une perception du MH semblable mais des difficultés chez ces personnes à interpréter l'état émotionnel (Moore et al., 1997 ; Hubert et al., 2007 ; Parron et al., 2008 ; Murphy et al., 2008). Ces stimuli visuels représentaient soit un acteur seul réalisant des mouvements neutres, soit des mouvements aléatoires « non-humains » (pour plus de détails, se reporter à la section sur les différents types d'animations) (Figure 14).

Une session avant et après la tâche de reconnaissance des IS a été proposée à chaque enfant. En effet, il était intéressant d'évaluer un éventuel effet facilitateur de reconnaissance d'un MH après la réalisation de sessions plus complexes (présence concomitante de deux acteurs). Chaque session se composait de 20 stimuli dont la moitié était des MH. Chaque

stimulus durait 3 s, quelle que soit sa nature. La consigne qui était donné à l'enfant indiquait « Dès que tu reconnais un bonhomme, tu appuies le plus vite possible sur la touche. Si tu ne reconnais pas un bonhomme, tu n'appuies pas ». Dans cette épreuve, une exigence de rapidité était également demandée. L'enfant était libre d'utiliser la main dominante de son choix. Nous avons enregistré le TR et l'exactitude de la réponse donnée.

III. 2. 1. 3. Epreuve de reconnaissance des interactions sociales

A l'image des protocoles expérimentaux précédents sur la reconnaissance des IS, quatre sessions étaient proposées à l'enfant. Au total, les animations étaient réparties en 52 IS et 52 NIS, dont la moitié était présentée en points, l'autre moitié en sticks. Chaque session durait au maximum 2 min. Sur les conseils des cliniciens, la consigne a été modifiée en remplaçant l'expression « faire ensemble » par « communiquer ». En effet, ce terme est employé dans les séances mises en place au CRA qui visent à développer les habiletés sociales des enfants autistes que nous avons rencontrés. Ainsi la consigne est devenue « Dès que tu reconnais que les deux bonhommes communiquent, tu appuies le plus vite possible sur le bouton à droite. Dès que tu reconnais que les deux bonhommes ne communiquent pas, tu appuies le plus vite possible à gauche ».

Avant de débiter l'épreuve, nous sollicitons l'enfant pour qu'il propose des synonymes du verbe « communiquer ». Nous lui propositions ensuite deux exemples détaillés à l'oral (« se saluer d'un signe de la main » et « jouer au football ») que nous illustrions par des mimes avec une tierce personne, externe à l'expérience. Deux pictogrammes étaient également matérialisés sur le clavier au-dessus des touches de réponse, l'un symbolisant la communication et l'autre barré pour l'absence de communication. La consigne était donc présentée à deux niveaux, verbalement par une définition et visuellement par des mimes et un rappel visuel graphique. Enfin, nous demandions à l'enfant de répéter la tâche qu'il allait réaliser pour vérifier qu'il l'avait comprise. Suivait ensuite une session d'entraînement qui s'appuyait sur les deux exemples précités. En pratique, une animation (IS ou NIS) d'une durée maximale de 3 s apparaissait à l'écran durant laquelle l'enfant donnait sa réponse en appuyant sur la touche correspondant à son choix (Figure 14). Dès lors, la seconde animation apparaissait de façon identique. En fin d'épreuve, les enfants se voyaient attribuer un diplôme du « petit observateur de bonhommes » qu'ils validaient en apposant leur signature. Nous

avons enregistré le type de réponse (correcte ou incorrecte) ainsi que le TR pour chaque essai à chaque session par enfant.

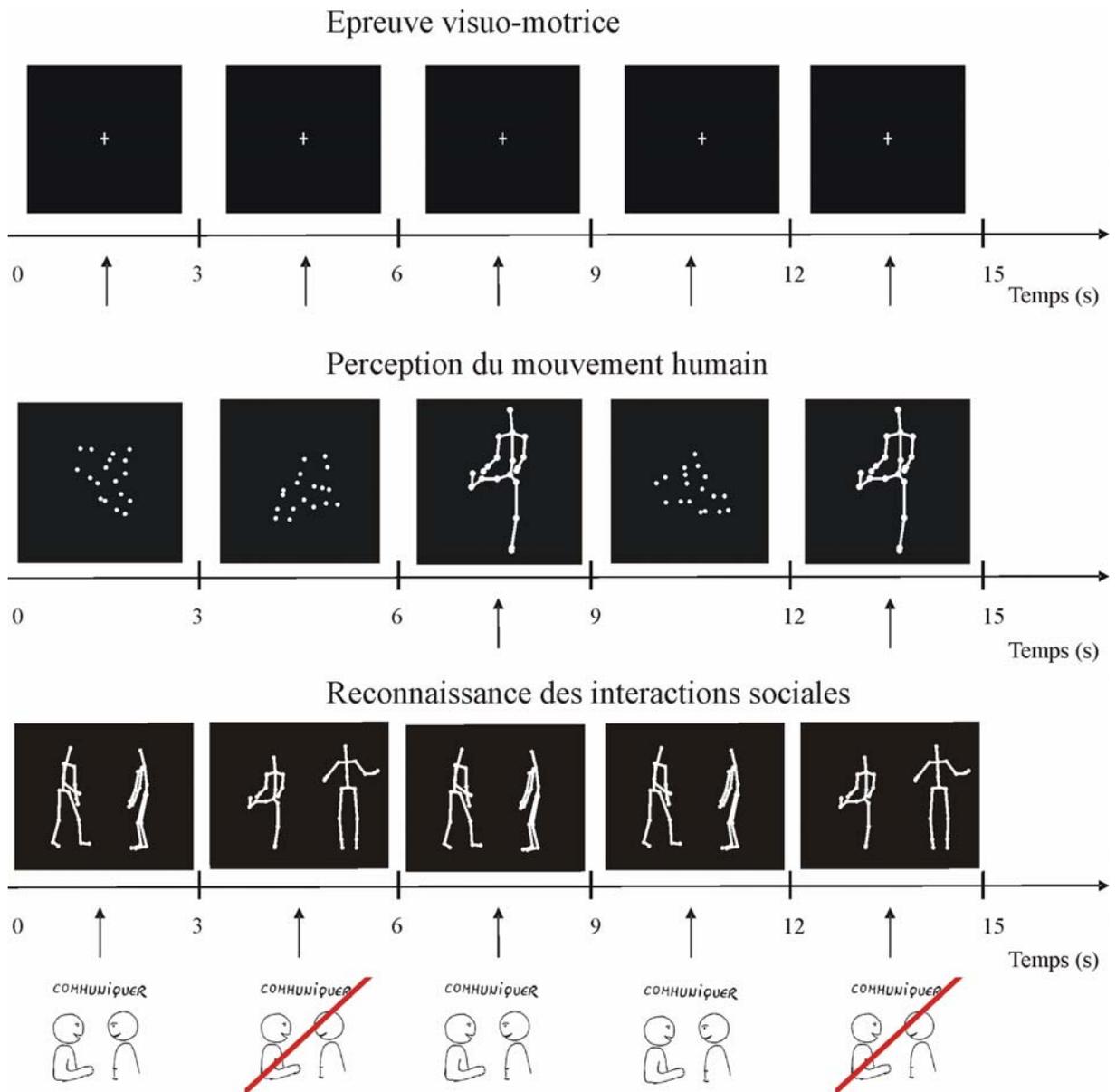


Figure 14 : Déroulé temporel des trois épreuves du protocole comportemental de reconnaissance des IS adapté à l'autisme. Les flèches signalent le moment où l'enfant donne sa réponse. Dans l'épreuve de reconnaissance des IS, nous avons présenté les pictogrammes qui permettaient de « guider » l'enfant pour classer les animations.

III. 3. Paramètres enregistrés et outils statistiques

III. 3. 1. Paramètres enregistrés

III. 3. 1. 1. Etude en développement typique

Dans le but de comparer les performances des enfants, nous nous sommes essentiellement intéressés aux essais correctement répondus. Afin d'éliminer les essais pour lesquels la réponse est anticipée, nous avons dans un premier temps déterminé le TR minimal nécessaire à la détection d'un MH et à la production d'une réponse. L'épreuve de détection du MH n'ayant été réalisée que dans l'étude chez l'enfant avec autisme, nous avons calculé la valeur du TR moyen obtenu dans le groupe des enfants de développement typique appariés aux enfants autistes. Ainsi tout essai présentant un TR inférieur au TR minimal a été considéré comme une réponse anticipée. Nous avons également comptabilisé les essais pour lesquels l'enfant n'avait pas donné de réponse.

Sur cette base, nous avons évalué un « profil de réponses » par groupe d'âges, à savoir que les essais non répondus, les réponses anticipées et les réponses incorrectes ont été considérés comme des réponses « fausses ». Nous avons utilisé pour nos analyses statistiques le nombre de réponses correctes au sein des quatre groupes d'âges par catégorie et par mode de présentation. Le TR n'a pas été retenu dans cette étude puisqu'aucune exigence de rapidité n'a été imposée aux enfants lors de la réalisation de l'épreuve.

III. 3. 1. 2. Etude adaptée aux enfants avec autisme

L'épreuve visuo-motrice nous a permis d'enregistrer le TR obtenus après la visualisation d'un stimulus visuel simple. Nous avons considéré le premier essai de cette épreuve (main droite) comme un essai d'entraînement que nous n'avons pas pris en compte dans le calcul de la moyenne du TR. Pour chaque enfant, nous avons ensuite moyenné les essais obtenus avec la main droite (15 essais), puis ceux obtenus avec la main gauche (16 essais). Nous avons dans un premier temps effectué une comparaison du TR moyen (mains confondues) entre les trois groupes d'enfants puis une comparaison des moyennes de TR « main droite *versus* main gauche » dans chaque groupe d'enfants afin de tester un éventuel effet de latéralisation.

Pour l'épreuve de perception du MH, nous avons conservé les essais de chaque enfant sur la base du TR moyen (mains confondues) qu'il avait obtenu dans l'épreuve précédente. En effet, nous avons considéré que le TR de la tâche visuo-motrice était le TR minimal. Tout essai présentant un TR inférieur au TR minimal préalablement défini était considéré comme une réponse anticipée. Par ailleurs, nous n'avons pas proposé d'essais d'entraînement lors de cette épreuve. C'est pourquoi, nous avons choisi de ne pas prendre en compte les deux premiers essais de la session « avant la tâche de reconnaissance des IS ». Dans cette épreuve, nous avons comparé au sein des trois groupes les TR obtenus pour des essais correctement répondus.

Pour l'épreuve de reconnaissance des IS, nous avons procédé de façon analogue. Ainsi nous avons retenu les essais de chaque enfant sur la base du TR moyen individuel obtenu dans l'épreuve de perception du MH de la session « avant la tâche de reconnaissance des IS ». Tout essai présentant un TR inférieur au TR minimal était considéré comme une réponse anticipée. Nous avons également comptabilisé les essais pour lesquels l'enfant n'avait pas donné de réponse. Ainsi nous avons évalué un « profil de réponses » par groupe d'enfants. Les essais non répondus, les réponses anticipées et les réponses incorrectes ont été considérés comme des réponses « fausses » et par conséquent ont été exclus des analyses statistiques. Dans cette épreuve, nous avons comparé au sein des trois groupes le nombre de réponses correctes et les TR obtenus pour des essais correctement répondus selon la catégorie et le mode de présentation des animations.

III. 3. 2. Outils statistiques

Les tests paramétriques ne sont applicables que si la distribution de la variable aléatoire étudiée suit la loi de Laplace-Gauss, dite « normale », dans chacune des populations dont sont extraits les échantillons comparés. Si ce n'est pas le cas, l'alternative est d'utiliser des tests dits « non paramétriques », autrement dit indépendants de la distribution de la variable (de l'anglais, *distribution-free*). Dans ce travail de thèse, nous avons utilisé le test de Kolmogorov-Smirnov pour vérifier la normalité de la distribution de la variable dans chacun des échantillons étudiés. Sur la base de cette analyse, nous avons effectué des tests paramétriques ou non paramétriques de façon appropriée.

Le but de ce travail est d'étudier les effets de deux facteurs (par exemple : groupe de sujets et catégorie, groupe de sujets et mode de présentation), agissant éventuellement en

synergie chez les mêmes sujets, pour réduire les effets de la variabilité entre individus. Cette démarche implique un plan expérimental à deux critères de classification croisés, avec des mesures au moins partiellement répétées. L'alternative non paramétrique de l'analyse de variance à deux critères de classification (ANOVA 2) croisés, pour des mesures partiellement répétées, n'ayant pas encore été décrite, nous avons parfois utilisé l'approche paramétrique classique, même si la distribution de la variable étudiée s'écarte de la distribution normale. Dans ce cas, les limites de cette approche sont précisées.

Sur les graphiques, les indicateurs de tendance centrale et de dispersion sont respectivement, la médiane et l'intervalle interquartile (Q1 et Q3), lorsque des tests non paramétriques ont été utilisés, et la moyenne et son erreur standard, lorsque l'analyse a été faite par des tests paramétriques. Pour l'ensemble des analyses statistiques, des différences ne sont considérées comme significatives que si le risque d'erreur de première espèce $\alpha < 0,05$, selon la convention généralement admise.

III. 3. 2. 1. Etude en développement typique

L'étude a été réalisée selon un plan expérimental à deux facteurs croisés : l'âge des sujets (quatre groupes d'âges : 4/6, 7/8, 9/10 ans et adultes) et soit le mode de présentation (stick ou point), soit la catégorie (IS ou NIS). La variable aléatoire étudiée est une variable discrète, il s'agit du nombre de réponses correctes (dans la suite du texte appelé simplement nombre de réponses) à la question « Les personnes font-elles ensemble ou chacune de leur côté ? ». Il faut préciser qu'au cours de cette étude le nombre de questions posées à un sujet est toujours le même quel que soit son âge, la catégorie ou le mode de présentation. Ce type de variable discrète peut être analysé comme une variable numérique continue (Fienberg, 1981; Zar, 1984). Les données sont traitées par une ANOVA 2 paramétrique pour mesures répétées¹³ bien que la normalité de la distribution des échantillons ne soit pas assurée. Puis, nous avons effectué une procédure de comparaisons multiples (test de Holm-Sidak) pour comparer les valeurs de la variable dans les différents groupes d'âges, pris deux à deux.

Dans une deuxième étape de l'analyse statistique, nous avons comparé, indépendamment, les effets de l'âge pour une catégorie par un test de Kruskal-Wallis qui est l'alternative non paramétrique de l'analyse de variance à un facteur de classification (ANOVA 1). Puis, nous avons effectué une procédure de comparaisons multiples (test de

¹³ Pour un même sujet, nous enregistrons par exemple une réponse en IS et une autre en NIS qui sont appariées.

« Tukey-like », non paramétrique) pour comparer les valeurs de la variable dans les différents groupes d'âges, pris deux à deux. Avec cette procédure le risque α de l'ensemble des comparaisons, deux à deux, est inférieur à 0,05. Lorsque cela était statistiquement possible, nous avons comparé le nombre de réponse dans les deux catégories (ou dans les deux modes de présentation) pour un même groupe d'âge par un test t en mesures répétées en non paramétrique (test de Wilcoxon).

III. 3. 2. 2. Etude adaptée aux enfants avec autisme

Dans la mesure où nous avons choisi d'apparier chaque enfant avec autisme (AUT) selon son âge chronologique (AC) et son âge mental (AM) à deux enfants de développement typique, nous avons systématiquement réalisé des tests statistiques en mesures répétées.

Pour l'épreuve de performance visuo-motrice, nous avons réalisé un plan expérimental à deux facteurs croisés : le groupe d'appartenance des sujets (AUT, AM et AC) et la détection d'un stimulus visuel. La variable aléatoire étudiée est une variable discrète, il s'agit du TR à la consigne « Dès qu'une croix apparaît sur l'écran, tu cliques le plus vite possible sur le bouton ». Afin de comparer les TR moyens (mains droite et gauche confondues), les données sont traitées par une ANOVA 1 paramétrique pour mesures répétées (distribution normale). Nous avons ensuite réalisé une ANOVA 2 paramétrique en mesures répétées à deux facteurs « groupe » et « latéralité » (main droite et main gauche).

Pour l'épreuve de perception du MH, nous avons réalisé un plan expérimental à deux facteurs croisés : le groupe d'appartenance des sujets (AUT, AM et AC) et la détection du MH. La variable aléatoire étudiée est une variable discrète, il s'agit du TR à la consigne « Dès que tu reconnais un bonhomme, tu appuies le plus vite possible sur la touche. Si tu ne reconnais pas un bonhomme, tu n'appuies pas ». Nous avons réalisé une ANOVA 1 non paramétrique en mesures répétées (test de Friedman) pour comparer le nombre de réponses correctes et les TR. Pour tester un éventuel effet impliquant l'ordre de passation, nous avons réalisé une ANOVA 2 paramétrique en mesures répétées à deux facteurs « groupe » et « ordre de passation » (sessions « avant » et « après » l'épreuve de reconnaissance des IS).

Pour l'épreuve de reconnaissance des IS, nous avons procédé de façon analogue à l'étude développementale. Nous avons réalisé un plan expérimental à deux facteurs croisés : le groupe d'appartenance des sujets (AUT, AM ou AC) et soit le mode de présentation (stick

ou point), soit la catégorie (IS ou NIS). Les variables aléatoires étudiées sont des variables discrètes, il s'agit du nombre de réponses correctes et du TR à la question « Les personnes communiquent-elles ou ne communiquent-elles pas ? ». Les données sont traitées par une ANOVA 2 paramétrique pour mesures répétées bien que la normalité de la distribution des échantillons ne soit pas assurée. Puis, nous avons effectué une procédure de comparaisons multiples (test de Holm-Sidak) pour comparer les valeurs de la variable dans les différents groupes d'âges, pris deux à deux.

Dans le but de comparer les TR obtenus dans les deux catégories et dans les deux modes de présentation dans le groupe d'enfants avec autisme, nous avons réalisé un test t de Student en mesures répétées (distribution normale).

Dans le but de tester si le quotient intellectuel (QI) non-verbal avait une influence sur la performance des enfants avec autisme, nous avons réalisé un test de Pearson pour évaluer le coefficient de corrélation entre les variables QI et pourcentage de réponses correctes dans chaque catégorie (IS et NIS).

Afin de comparer les performances pour reconnaître d'abord une IS fortement émotionnelle puis une IS faiblement émotionnelle entre les enfants autistes et les enfants non-autistes, nous avons réalisé une ANOVA 1 paramétrique (distribution normale) en mesures répétées. Puis, nous avons effectué une procédure de comparaisons multiples (test de Holm-Sidak) pour comparer les valeurs de la variable dans les différents groupes d'âges, pris deux à deux.

😊 En quelques lignes...

Nous nous sommes interrogés sur les aptitudes de reconnaissance des interactions sociales au cours du développement. Nous avons élaboré un test informatisé présentant des animations en points lumineux de deux personnes engagées ou non dans des interactions sociales. Ce test a été proposé à de jeunes enfants au développement typique qui avaient pour consigne de catégoriser les animations observées. A l'issue de cette étude, nous avons adapté ce dispositif expérimental aux spécificités des enfants avec autisme et nous l'avons enrichi d'épreuves complémentaires préalables comme l'épreuve visuo-motrice ou l'épreuve de perception du mouvement humain.

IV. L'IMAGERIE PAR RESONANCE MAGNETIQUE FONCTIONNELLE

L'imagerie par résonance magnétique (IRM) inventée au début des années 1970 a été une véritable révolution en biologie et en médecine grâce à la précision anatomique des images de cerveau. L'IRM fonctionnelle (IRMf) dont l'invention date des années 1990 constitue une approche dynamique mesurant indirectement l'activité neuronale grâce aux variations de débit, de volume et d'oxygénation du sang. Dans cette section, nous décrirons les spécificités de l'IRMf et le choix du dessin expérimental puis nous détaillerons les étapes de prétraitement des données et les outils statistiques que nous avons utilisés dans nos deux études pour terminer par les méthodes de localisations anatomiques.

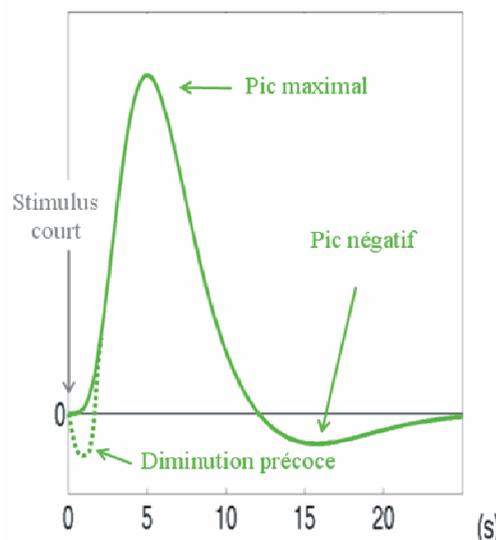
IV. 1. L'IRM fonctionnelle (IRMf)

IV. 1. 1. Bases neurophysiologiques du signal en IRMf

La méthode d'IRMf permet de mesurer des variations d'oxygénation sanguine locale liée à une tâche comportementale motrice, sensorielle et / ou cognitive afin de localiser les activations cérébrales. Cette méthode utilise un agent de contraste endogène : l'hémoglobine des globules rouges du sang qui n'a pas les mêmes propriétés magnétiques selon son état d'oxygénation. L'hémoglobine contient quatre groupes polycycliques ferreux appelés des hèmes. L'oxygène se fixe à chaque hème par liaison de coordination avec l'atome de fer. Lorsque l'oxygène est lié au fer (oxyhémoglobine), tous les électrons du fer sont appariés, l'hème est diamagnétique et le champ magnétique environnant n'est pas perturbé. Lorsque l'hémoglobine est non chargée en oxygène (déoxyhémoglobine), les quatre électrons sont non appariés, l'hème est paramagnétique et un champ magnétique supplémentaire est généré par ces électrons libres ce qui a pour conséquence de perturber le signal (diminution de la composante T_2) en créant des inhomogénéités du champ magnétique. C'est précisément cet effet qui est mesuré en IRMf

Lors d'une activité cérébrale, la consommation d'oxygène au niveau synaptique augmente dans un premier temps. A ce stade, la concentration en déoxyhémoglobine

augmente car l'oxygène lié à l'hémoglobine est dissocié de celle-ci pour être livré aux tissus biologiques. Secondairement, une augmentation de débit et de volume sanguin cérébral régional apparaît afin d'enrichir le réseau capillaire veineux en hémoglobine (le compartiment artériel étant saturé en oxygène). Ceci entraîne une diminution relative de la concentration veineuse en désoxyhémoglobine : ce phénomène constitue la réponse BOLD, de l'anglais *Blood Oxygenation Level Dependant*. La réponse enregistrée ou signal BOLD est communément appelée "réponse hémodynamique" (de l'anglais, *hemodynamic response function*). Contrairement à l'activité synaptique qui en est à l'origine, la réponse hémodynamique corrélée à l'augmentation du débit sanguin local n'est pas immédiate en raison des résistances mécaniques des parois vasculaires. Elle atteint sa valeur maximale après environ 4 à 6 s, puis perdure pendant une dizaine de secondes après l'arrêt de l'activité neuronale (Figure 15). A ce stade, le débit sanguin diminue et la concentration en désoxyhémoglobine retourne à sa valeur initiale.



(d'après le *Functional Imaging Laboratory, University College de Londres*)

Figure 15 : Décours temporel de la réponse hémodynamique à l'apparition d'un stimulus

IV. 1. 2. La technique de séquence écho-planaire

Comme nous l'avons mentionné précédemment, les inhomogénéités magnétiques induites par la désoxyhémoglobine réduisent la valeur locale du temps de relaxation transverse T_2 , noté par convention T_2^* , et donc réduisent le signal enregistré. Le temps de relaxation T_2^* est mis à profit par les séquences d'imagerie *EPI* (*Echo-Planar Imaging*) ce qui permet d'obtenir des images pondérées en T_2^* . En d'autres termes, si la concentration

locale en désoxyhémoglobine diminue alors la valeur de T_2^* augmente en raison d'une diminution des inhomogénéités dues aux molécules de désoxyhémoglobine.

Afin de visualiser en temps réel les variations de concentration en désoxyhémoglobine au cours d'une activité cérébrale, la méthode d'IRMf doit répondre à des exigences d'acquisition d'images sur des temps très courts. Ceci est possible en utilisant un système de gradients de champ magnétique qui peuvent être inversés extrêmement rapidement. Ces séquences permettent la production d'échos multiples à partir du même signal initial. Ainsi malgré un signal très faible, la détection est possible grâce à ce type d'acquisition appelé écho-planaire ou EPI.

IV. 1. 3. Avantages et limites de la méthode BOLD

L'avantage majeur de l'IRMf repose sur l'utilisation d'un marqueur endogène de l'activité synaptique. Cette caractéristique constitue un avantage considérable à deux titres. D'abord, grâce aux séquences EPI, cette méthode mesure en temps réel et continu des variations de concentration locale en désoxyhémoglobine ce qui permet l'étude de processus dynamiques. Par ailleurs, c'est une technique totalement non invasive pour le sujet puisqu'elle est basée sur le suivi d'un traceur naturellement présent dans l'organisme. La résolution spatiale est habituellement comprise entre 3 et 4 mm et permet ainsi une localisation précise des activations cérébrales liées à la tâche comportementale.

Cependant il faut tenir compte d'un élément fondamental pour interpréter les signaux d'activation observés dans une étude en IRMf. En effet, la dynamique temporelle des phénomènes vasculaires est la conséquence d'une augmentation locale du débit sanguin liée à la vasodilatation des petites artères irriguant la région cérébrale. De plus, la vascularisation n'est pas répartie de façon homogène sur l'ensemble du cerveau. L'artère cérébrale antérieure par exemple siège dans la scissure de Sylvius et irrigue principalement les cortex frontal et temporal. Ainsi certaines régions cérébrales sont davantage irriguées par des artères plutôt que des artérioles suggérant des variations de débit sanguin et par conséquent de signal BOLD. Comme nous l'avons abordé précédemment, la réponse hémodynamique est donc mesurée de façon indirecte et ne suit pas le décours temporel de l'activité cérébrale *per se*. En outre, comme nous le verrons dans la section du prétraitement des données, les analyses statistiques reposent sur l'hypothèse *a priori* que la réponse hémodynamique est une fonction linéaire admettant qu'une activité cérébrale donnée entraîne la même augmentation de débit sanguin

local, quel que soit le niveau de débit global. D'autre part, il est essentiel de retenir que la désoxyhémoglobine est un traceur intravasculaire ce qui signifie que le signal BOLD provient du compartiment veineux. Ceci peut être à la source de biais en ce qui concerne la localisation des activations, dans la mesure où une activation d'origine veineuse peut en fait être à une certaine distance de la zone corticale activée.

Par ailleurs, il faut comprendre ce que la notion d'activation cérébrale renseigne dans une étude en IRMf. En effet, si l'on considère une région cérébrale comme étant constituée de populations de neurones excitateurs ou inhibiteurs alors se pose la question d'une activation en terme de balance entre des réponses synaptiques excitatrices et inhibitrices. Les modifications dans la balance excitation / inhibition pourraient affecter fortement les besoins énergétiques du métabolisme cérébral et par conséquent, les régulations du débit sanguin cérébral ce qui aurait pour résultat de perturber le signal BOLD (Logothetis, 2008). Ainsi ce qui est habituellement interprété comme une activation cérébrale dans les données en IRMf pourrait aussi signifier une forte augmentation de signal liée à un besoin métabolique accru d'une région cérébrale où l'activité neuronale est inhibitrice. Néanmoins il a été montré qu'en dépit du nombre de neurones inhibiteurs inférieur à celui des neurones excitateurs et grâce à une localisation plus stratégique des synapses inhibitrices sur les corps des neurones post-synaptiques, la réponse inhibitrice dans certaines régions cérébrales (cortex moteur par exemple) serait plus efficace avec une moindre demande énergétique (Waldvogel et al., 2000). Ainsi l'inhibition ne conduirait pas à une augmentation du signal BOLD, le phénomène de « désactivation » ne serait ainsi pas entièrement fondé (Waldvogel et al., 2000).

Enfin, les images en IRMf sont sujettes à des artefacts. Une première source d'artefacts est liée à la sensibilité de ces images aux variations de susceptibilité magnétique, principalement au niveau des interfaces os / tissus. Par ailleurs, les mouvements générés par la respiration, les battements cardiaques ou les mouvements de tête du sujet durant un examen d'IRMf peuvent faire apparaître des zones d'augmentation du signal non corrélées à la tâche. Quand ces mouvements sont peu importants, il est toutefois possible de les corriger comme nous allons l'aborder dans la section sur le prétraitement des images.

IV. 2. Choix du dessin expérimental

La conception du dessin expérimental est une étape cruciale dans l'élaboration d'une étude en IRMf. Il s'agit de transposer les hypothèses de travail dans un protocole expérimental adapté. Ce protocole doit tenir compte des contraintes temporelles d'acquisition à la fois liées à la réponse hémodynamique attendue mais aussi compatibles avec le confort du sujet qui réalise une tâche dans des conditions particulières et imposées : être allongé dans un tunnel avec un bruit important. Par ailleurs il est fondamental de penser à la façon d'analyser les résultats avant de réaliser l'expérience. Ainsi le choix du dessin expérimental conditionne les analyses statistiques envisagées pour répondre aux questions scientifiques. Dans les paragraphes qui suivent, nous allons détailler les conditions expérimentales de notre paradigme en précisant les paramètres temporels et les paramètres d'acquisition des données que nous avons utilisés pour conduire nos deux études d'IRMf.

IV. 2. 1. Choix des conditions expérimentales : Méthode soustractive

Le traitement statistique des images permet de mettre en évidence des régions cérébrales significativement activées dans une condition par rapport à une autre. La définition de contraste sera détaillée dans la partie consacrée aux analyses statistiques. L'analyse des données d'imagerie fonctionnelle est donc comparative. L'analyse statistique compare au minimum le signal enregistré entre deux conditions A et B. Cette analyse est appelée contraste simple ou soustraction simple. Dans notre cas, la comparaison de la condition A « interaction sociale » (IS) avec la condition B, « non interaction sociale » (NIS) met en évidence les régions qui ont subi une variation du signal BOLD dans la condition IS par rapport à la condition NIS.

Pouvoir faire un lien entre l'activité cérébrale et la reconnaissance d'une IS implique de faire l'hypothèse d'une organisation additive ou sérielle des différentes composantes de la tâche cognitive. On peut alors considérer que la comparaison statistique du signal BOLD entre deux conditions met en évidence les régions cérébrales impliquées dans la composante qui distingue les deux conditions comparées. C'est l'hypothèse d'insertion pure décrite par Friston et collaborateurs (Friston et al., 1996). Par exemple, la condition IS pourrait être équivalente à l'équation suivante : IS = composante « mouvement humain en point lumineux » + composante « valeur sociale » tandis que la condition NIS pourrait être égale à

NIS = « mouvement humain en points lumineux ». Ainsi la « soustraction » de ces deux conditions pourrait informer sur la composante « valeur sociale » qui peut se généraliser par le terme x.

IV. 2. 2. Choix des paramètres temporels de la stimulation

L'IRMf permet la mise en œuvre d'une variété de dessins expérimentaux que nous pouvons classer en deux grandes catégories : les paradigmes de type « bloc » et de type « événementiel ». Les paradigmes en bloc comportent une alternance de tâches comportementales chacune réalisées pendant une période groupée (« bloc ») de quelques dizaines de secondes, plusieurs volumes d'images cérébrales sont obtenues au cours de chaque bloc d'essais (stimuli). Ce type de paradigme repose sur le fait que la réponse hémodynamique obtenue après l'apparition d'un stimulus (ou événement) se somme à la réponse hémodynamique d'un second événement proche. Ceci conduit à l'apparition d'un « plateau » résultant de plusieurs réponses hémodynamiques après stimulations successives. Ce type de paradigme présente l'avantage d'une forte amplitude de la réponse mais a pour inconvénient d'induire une éventuelle habitude pour le sujet.

Nous avons opté pour un paradigme événementiel au cours duquel les stimuli de courte durée sont présentés successivement et de façon aléatoire entre les différentes conditions expérimentales. Entre deux événements, un temps variable noté intervalles inter-stimuli (ISI) permet à la réponse hémodynamique de diminuer sans masquer la réponse liée au second événement. Dans nos études, la moyenne des ISI était de 3500 ms, ils étaient toujours compris entre 3000 et 5000 ms. La réponse hémodynamique évoquée par chaque stimulus est enregistrée sur toute sa durée. Les événements sont répétés plusieurs fois et les réponses hémodynamiques des différentes répétitions sont moyennées après le recalage temporel (voir les étapes du prétraitement). Ce type de paradigme présente l'avantage de mesurer la forme de la réponse hémodynamique propre à une stimulation, et maintient l'attention du sujet. En revanche, cela nécessite de présenter un nombre important d'événements pour obtenir une puissance statistique et par conséquent, cela allonge la durée d'acquisition fonctionnelle pour le sujet. Nous avons schématisé dans la Figure 16 le dessin expérimental de nos études en termes de durée du stimulus, ISI, réponse etc.

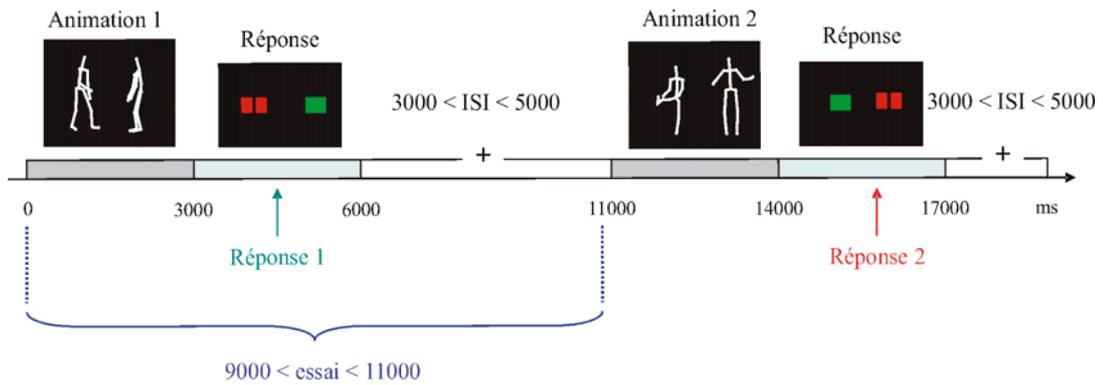


Figure 16 : Mise en images du dessin expérimental que nous avons adopté pour les deux études en IRMf. Un essai comprend la période d'observation de l'animation, la période où le sujet donne sa réponse puis l'intervalle interstimuli qui permet de laisser le temps à la réponse hémodynamique de diminuer.

IV. 2. 3. Acquisition des données en IRMf

Dans les deux études en IRMf présentées dans ce travail de thèse, les images ont été acquises sur un imageur corps entier de 3 Teslas de marque Images Bruker (Ettlingen, Germany) et de type 3-T MEDSPEC 30 / 80 AVANCE, équipé d'une antenne « tête » circulaire polarisée. Nous avons pris soin de positionner correctement le sujet avant l'acquisition pour éviter des distorsions d'images ou des pertes de signal dans certaines régions cérébrales. La position de la tête doit être de telle sorte que les coupes acquises soient le plus possible parallèle à l'axe CA-CP (commissure antérieure et commissure postérieure). En effet, lors de l'étape de normalisation, les images sont inclinées pour que les coupes axiales soient parallèles à cet axe. De plus, un fichier « masque spatial » qui contient l'intersection de toutes les images fonctionnelles des sujets est créé par le logiciel SPM. Aussi les analyses statistiques de groupe ne s'appliquent qu'aux voxels situés à l'intérieur de ce masque minimal. Si des coupes acquises sont initialement trop inclinées par rapport à l'axe CA-CP, des régions cérébrales en particulier au niveau occipital et pariétal peuvent être tronquées.

Pour chaque sujet, nous avons acquis une image structurale du cerveau entier (cervelet compris) pondérée en T_1 de haute résolution spatiale avec une séquence en écho de *spin* de type *inversion-recovery* (résolution des voxels de $1 \times 0,898 \times 1,422$ mm) dans le plan sagittal. Pendant l'acquisition des images fonctionnelles, nous avons utilisé une séquence écho-planaire pour obtenir des images pondérées en T_2^* couvrant la totalité du cerveau

(cervelet compris). Trente-deux coupes axiales de 3 mm d'épaisseur avec un espace inter-coupe de 1mm étaient acquises pour un volume (soit la totalité du cerveau, cervelet compris) avec un temps de répétition $TR = 2133$ ms ; un temps d'écho $TE^{14} = 30,0$ ms ; un angle de basculement de $79,5^\circ$; un champ de vue (*field of view, FOV*) de 192 mm et une matrice de 64×64 constituée de voxels de taille $3 \times 3 \times 4$ mm. Les sujets ont réalisé quatre sessions d'acquisition fonctionnelles. Chaque session durait 4 min et 50 s ce qui permettait d'acquérir 137 volumes fonctionnels. La durée totale du paradigme était d'environ 40 min.

IV. 2. 4. Procédure expérimentale

La tâche comportementale réalisée par les participants adultes et enfants pendant les acquisitions fonctionnelles en IRMf était identique. Les sujets étaient installés le plus confortablement possible dans une position allongée dans le tunnel de l'appareil d'IRM. Un soin particulier était porté à l'inclinaison appropriée de la tête afin de limiter les distorsions d'images ainsi qu'à son immobilisation la plus confortable possible afin d'éviter des mouvements de la tête qui nuisent à l'analyse des images. Des écouteurs étaient fournis pour atténuer le bruit de l'aimant et permettaient également de communiquer avec le sujet. Cette communication était basée sur la possibilité pour l'expérimentateur, de parler avec un microphone et pour le sujet, de répondre à l'aide du clavier ce qui se matérialisait, à l'extérieur de la salle réservée à l'IRM, par un clignotement d'une diode lumineuse. Ce dispositif de communication a permis d'instaurer un climat de confiance, en particulier avec les enfants dont l'attention et la motivation étaient maintenues entre chaque session.

Pendant l'acquisition des images anatomiques, les sujets visualisaient durant 12 min une série de photographies représentant des paysages apaisants et n'avaient pas de consigne particulière (excepté de rester immobile). Quant aux enfants, ils visualisaient un dessin animé adapté à leur âge. Pendant l'acquisition des images fonctionnelles, les sujets réalisaient la tâche de reconnaissance des interactions sociales. Les animations étaient projetées grâce à un système de miroir. Le sujet devait alors observer l'animation pendant 3 s. Ensuite une image apparaissait à l'écran pour indiquer au sujet de répondre à la question « Les deux personnes font-elles ensemble ou chacune de leur côté ? ». Cette image représentait un rectangle plein vert pour symboliser deux personnes interagissant ensemble (IS) et deux rectangles pleins

¹⁴ Le temps d'écho TE est le temps entre le milieu de l'impulsion RF et le sommet du signal RMN.

rouges symbolisant deux personnes réalisant des mouvements indépendamment l'une de l'autre (NIS). Les rectangles verts et rouges apparaissaient aléatoirement à droite ou à gauche de l'écran pour que le sujet ne puisse pas anticiper la réponse. Pour répondre, un clavier ergonomique et amagnétique été placé sous la main droite, l'index prêt à presser le bouton de gauche et le majeur, le bouton de droite. Par exemple, si le sujet pensait qu'il venait de visualiser une animation où les personnes interagissaient, si le rectangle vert apparaissait à gauche de l'écran alors le sujet cliquait sur la touche gauche de son clavier. Durant la période entre deux animations (intervalle interstimuli, ISI) d'une durée s'échelonnant aléatoirement de 3 à 5 s, une croix de fixation apparaissait à l'écran.

Les sujets ont réalisé quatre sessions d'acquisition fonctionnelle de 4 min et 50 s chacune. Au total, 112 stimuli étaient visualisés par les sujets dont 56 appartenant aux IS et 56 aux NIS. Chaque catégorie (IS et NSI) était présentée à moitié en points et l'autre moitié en sticks (voir la partie sur l'élaboration des animations). Avant les acquisitions en IRMf, une session d'entraînement était proposé à chaque sujet pour vérifier que la consigne était correctement comprise. Nous avons enregistré le type de réponse donnée par le sujet afin d'évaluer la performance en terme de réponses correcte et incorrecte. Les sujets étaient tous entraînés avant les acquisitions à l'extérieur de l'appareil d'IRMf. A la fin de l'expérience, les sujets étaient interrogés sur les éventuelles difficultés rencontrées lors de la réalisation de la tâche dans l'IRMf.

Nous souhaiterions détailler la mise en œuvre de l'étude chez l'enfant de développement normal puisqu'il s'agit d'une des premières en France et qu'il est important de souligner sa faisabilité (Figure 17). Nous avons élaboré un « parcours » ludique et didactique adapté à l'âge des enfants. Chaque enfant, accompagné d'un de leurs parents, était chaleureusement accueilli au centre d'IRMf. Nous prenions d'abord le temps de présenter les pièces expérimentales et les ingénieurs du centre. Avant de rentrer dans la salle de la machine d'IRM, nous expliquions toutes les contraintes liées à l'IRMf (« gros aimant ultra puissant ») dans un discours constamment adapté à l'âge de nos jeunes sujets.

Avant les acquisitions, chaque étape était définie pour que l'enfant puisse visualiser et trouver un sens aux gestes que nous allions réaliser lorsqu'il serait allongé dans le tunnel de l'IRM. Sous le thème de la conquête de l'espace, nous lui avons expliqué les raisons pour lesquelles il porterait des protections acoustiques (« le bruit de la fusée ») et pourquoi sa tête serait immobilisée et placée dans un « casque de cosmonaute » permettant d'enregistrer « les signaux de son cerveau » (antenne-tête). L'enfant se rendait compte de la profondeur et du

diamètre du tunnel où il serait allongé (« la fusée ») ; il pouvait également constater que ce tunnel était ouvert de part et d'autre. Il visualisait également l'endroit où l'expérimentateur se tiendrait à ses côtés pendant toute la durée des acquisitions. Nous lui avons montré en quoi consistait le réglage de l'antenne radio-fréquence et l'installation du miroir réfléchissant les animations. Dans la salle de pilotage, nous avons présenté les différents ordinateurs et précisé leur utilité. Nous avons ensuite simulé une conversation avec le microphone et la diode lumineuse pour que l'enfant comprenne qu'il pouvait à tout moment interrompre l'étude. Cette présentation complète des étapes du protocole nous semblait indispensable pour instaurer un climat de confiance et de sécurité chez les enfants. A la fin de ce parcours, nous demandions à l'enfant s'il acceptait de participer à l'étude. Son souhait devait explicitement être confirmé par une signature.



Figure 17 : Agathe, huit ans, à la sortie de son aventure scientifique. Sur cette photographie, nous pouvons observer l'ouverture du tunnel et le lit coulissant de l'IRMf (« la fusée »), l'antenne-tête (« casque de cosmonaute ») et le clavier de réponse.

Dans un second temps, nous expliquions le protocole expérimental sur la reconnaissance des interactions sociales. L'expérimentateur, qui accompagnerait l'enfant pendant les acquisitions en IRMf, présentait à l'enfant la consigne et les codes couleurs, comme nous l'avons détaillé ci-dessus. Dans une salle calme, l'enfant (non accompagné de ses parents) réalisait une session d'entraînement pour se familiariser avec la tâche comportementale. Nous lui demandions une seconde fois s'il acceptait de participer à l'étude avant d'entrer dans l'appareil d'IRMf.

A la fin des acquisitions, nous prenions un temps privilégié avec l'enfant dans une salle calme pour qu'il raconte « son aventure » afin de repérer d'éventuelles difficultés. Nous lui présentions l'image anatomique de son cerveau (« image de l'intérieur de ta tête ») avant de lui décerner le diplôme du « petit explorateur du cerveau ». Tous les enfants repartaient

enchantés de leur aventure scientifique et nombre d'entre eux ont présenté leurs prouesses dans des exposés à l'école.

😊 En pratique...

La conception du dessin expérimental est une étape cruciale dans l'élaboration d'une étude en IRMf puisqu'il s'agit de transposer des hypothèses de travail en protocole expérimental. Nous avons choisi la méthode soustractive qui a permis de comparer la condition IS avec la condition NIS. Ce contraste simple met en évidence les régions cérébrales qui ont subi une variation du signal BOLD dans la condition IS par rapport à la condition NIS.

Nous avons opté pour un paradigme événementiel au cours duquel les animations IS et NIS de courte durée (3 s) étaient présentées successivement et de façon aléatoire. Les images ont été acquises sur un imageur corps entier de 3 Teslas. Les images anatomiques étaient pondérées en T_1 de haute résolution spatiale et les images fonctionnelles en T_2^* par séquence écho-planaire sur la totalité du cerveau. La durée totale du paradigme était d'environ 40 min. Les sujets adultes et enfants ont réalisé la tâche de reconnaissance des interactions sociales.

IV. 3. Le prétraitement des images

Pour les deux études en IRMf présentées dans cette thèse, le prétraitement des données a été réalisé avec le logiciel *Statistical Parametric Mapping (SPM)* développé par Friston et collaborateurs au *Wellcome Department of cognitive neurology* de Londres. Cette méthode constitue une étape essentielle dans la localisation cérébrale des activités hémodynamiques associées aux tâches d'intérêt et demeure à l'heure actuelle un outil de référence, largement utilisé au sein de la communauté des chercheurs en neurosciences cognitives. Ce logiciel permet de réaliser aussi bien des opérations de prétraitement que les analyses statistiques des données comme nous le verrons par la suite.

Le but premier de toute étude en neuro-imagerie est de déterminer les variations du signal BOLD dans des régions cérébrales pendant une tâche expérimentale et de les localiser par comparaison avec des données neuro-anatomiques. Plusieurs étapes de préparation des

images par sujet sont nécessaires avant l'analyse statistique de groupe. La Figure 18 récapitule les différentes opérations réalisées par ce logiciel.

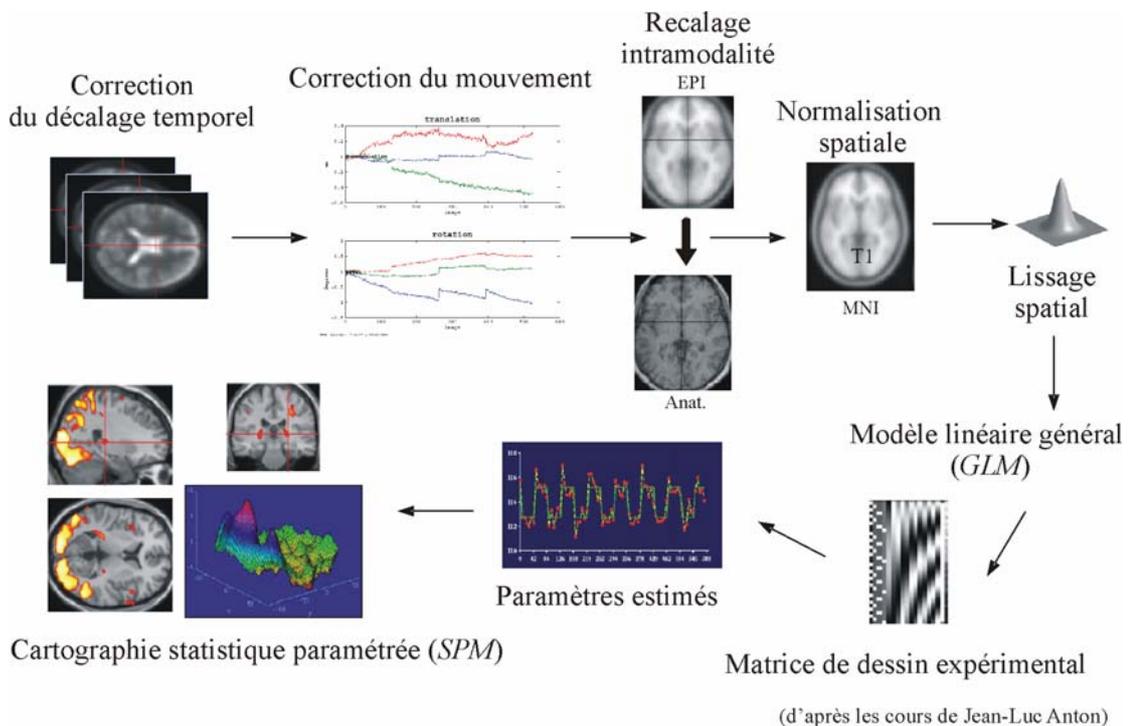


Figure 18 : Diagramme résumant les différentes étapes de préparation et d'analyses statistiques des données réalisées par le logiciel SPM. L'ordre chronologique des opérations s'effectue de la gauche vers la droite. Les procédures de préparation des images regroupent les principales étapes de réaligement, de normalisation spatiale et de lissage anatomique. Le modèle linéaire général permet d'obtenir les cartes statistiques non corrigées. La théorie des champs gaussiens permet de déduire des cartes statistiques la significativité corrigée de chaque région.

Au début de l'acquisition de chaque session, les premières images enregistrées sont artéfactées car le signal IRM se stabilise. Ainsi il faut éliminer ces images pour ne pas biaiser les résultats de l'étude. Le nombre d'images à supprimer doit correspondre au temps nécessaire pour que la stabilisation du signal IRM ait lieu. Dans nos études, nous avons éliminé les six premières images ce qui correspond à environ trois temps de répétition noté TR (temps entre deux impulsions) avec TR = 2133 ms.

IV. 3. 1. Correction des décalages temporels (*slice timing*)

Lors de l'acquisition fonctionnelle, les différentes coupes d'un même volume ne sont pas acquises simultanément, mais successivement et en mode entrelacé pendant une durée

égale au TR. Nous avons choisi le mode entrelacé (et non séquentiel) pour limiter l'influence du signal d'une coupe à l'autre. Par exemple, le TR de nos deux études est de 2133 ms ce qui signifie que la dernière coupe du volume est systématiquement acquise plus de 2 s après la première coupe. La correction proposée par SPM consiste à « ramener » par interpolation temporelle l'instant d'acquisition de toutes les coupes à un instant commun, qui est l'instant d'acquisition d'une des coupes du volume, qualifiée de coupe de référence. Pour le mode entrelacé, la coupe de référence choisie correspond au milieu temporel de l'acquisition du volume. Par exemple, nous avons 32 coupes entrelacées (coupes impaires 1, 3, 5... 31 puis coupes paires 2, 4, 6... 32) dans un volume acquis. Ainsi le milieu temporel correspond à la coupe en 16^e position soit la coupe n°31. Or en raison d'une éventuelle distorsion du signal dans les coupes les plus basses (n° 1 ou 2) ou les plus hautes (n° 31 ou 32), la coupe de référence sera plutôt la coupe n° 27, située en 14^e position. Lors des analyses statistiques, grâce à la correction effectuée sur les décalages temporels, on considère ainsi que toutes les coupes du volume ont été acquises simultanément.

IV. 3. 2. Correction du mouvement (*realign*)

Cette opération permet de corriger les artefacts dus aux mouvements de la tête du sujet, inévitables pendant une acquisition de plusieurs dizaines de min (environ 20 min dans nos deux études). Cette opération est fondamentale, en particulier chez l'enfant, pour s'assurer que l'immobilité est quasi-totale afin d'inclure le sujet dans le groupe étudié. Si les mouvements sont brusques et supérieurs à 3 mm, la session ne peut être utilisée. En effet, si ces mouvements ne sont pas corrigés ou qu'ils sont trop importants pour être suffisamment corrigés, il peut en résulter de « faux positifs » dans les cartes d'activations obtenues, c'est-à-dire des voxels qui sont considérés comme activés après seuillage alors qu'ils ne le sont pas. Le principe du recalage consiste dans un premier temps à choisir une image de référence (soit la 1^e des images après stabilisation du signal IRM) au sein de la série temporelle acquise puis à corriger le déplacement, selon les trois axes de l'espace (x , y , z) en translations et en rotations, des autres images de la série, à l'aide d'une matrice correspondant à la transformation géométrique affine de ce déplacement par rapport à l'image de référence.

IV. 3. 3. Recalage intramodalité (*coregister*)

Cette étape permet la mise en correspondance des images fonctionnelles EPI (pondérées en T_2) sur l'image anatomique (pondérée en T_1) d'un même sujet. Comme dans l'étape précédente, une matrice est créée pour permettre la transformation géométrique entre la première image fonctionnelle et l'image anatomique. Cette matrice s'applique ensuite à toute la série d'images fonctionnelles.

IV. 3. 4. Normalisation spatiale (*normalize*)

Pour réaliser une analyse de groupe, il faut que les images des différents sujets soient comparables. Comme il existe une grande variabilité de taille et de forme du cerveau humain¹⁵, il est nécessaire d'appliquer une transformation aux images. Cette étape permet de placer dans un même espace toutes les images anatomiques et fonctionnelles des sujets d'un espace standard commun ou *template* (repère du *MNI, Montreal Neurological Institute*). Pour nos deux études¹⁶, nous avons choisi l'espace du MNI qui correspond à l'image pondérée en T_1 , générée à partir d'une IRM de 1,5 Teslas. Cet espace a été défini à partir de l'enregistrement de 152 cerveaux adultes au MNI. Il représente un volume de 91 coupes de 2 mm d'épaisseur, constitué de plans de 109×91 voxels de taille $2 \times 2 \times 2$ mm. Il est construit sur un système proche de celui de Talairach et Tournoux (1988) complété par le cervelet. Dans ce système, chaque voxel de l'image est repéré par des coordonnées (x, y, z) dans les trois plans de l'espace.

Pour ce faire, un algorithme dans SPM permet de calculer une déformation globale de l'image individuelle anatomique qui minimise la différence avec l'image anatomique du MNI. Ceci permet par la suite de calculer les coordonnées des zones activées dans un repère commun et par conséquent de comparer les activations entre sujets en contournant les limites de la variabilité anatomo-fonctionnelle interindividuelle. En tenant compte de la résolution de base, les images sont réécrites avec une taille de voxel différente pour l'anatomique (1 1 1) et les images fonctionnelles (3 3 3).

¹⁵ Cette variabilité est d'autant plus marquée si l'on souhaite comparer des données chez l'enfant et l'adulte. Nous précisons ce point dans une section consacrée à l'étude développementale.

¹⁶ Les choix méthodologiques concernant l'étude chez l'enfant, notamment la normalisation, ont été abordés dans une section entièrement dédiée au développement.

IV. 3. 5. Lissage spatial (*smoothing*)

Cette étape permet d'une part d'augmenter le rapport signal sur bruit et d'autre part d'atténuer les disparités anatomiques individuelles locales. Le signal acquis dans un voxel donné n'est pas indépendant du signal acquis dans les voxels voisins d'où les biais de corrélation spatiale. Le lissage spatial des données permet de contourner ce biais notamment au moment de l'étape de seuillage des cartes d'activations. En pratique, le lissage des données est réalisé à partir d'un filtre passe-bas qui coupe les hautes fréquences. La méthode de seuillage utilisée dans SPM s'appuie sur la théorie des champs aléatoires gaussiens. Il est recommandé d'utiliser un filtre équivalent à deux à trois fois la taille du voxel dans les études de cas (mono-sujet) et équivalent à quatre voire six fois la taille du voxel dans les études de groupe. Nous avons choisi de lisser avec un filtre de 8mm pour le groupe afin d'obtenir des activations plus focales (les activations étaient très étendues avec des filtres supérieurs à 8 mm).

😊 En pratique ...

En pratique dans nos études, les six premiers volumes EPI de chaque session ont été supprimés et nous avons procédé aux étapes de prétraitement sur les 131 volumes suivants. Ces images ont été corrigées pour le décalage temporel (*slice timing*) et les mouvements de la tête (*realign*). Dans l'étude sur la maturation des circuits centraux chez l'enfant au développement typique, nous avons retenu les trois premières sessions fonctionnelles chez l'adulte et les trois « meilleures » sessions chez l'enfant correspondant à une absence de mouvement. Les images anatomiques ont ensuite été mises en correspondance (*coregister*) aux images EPI pour chaque sujet avant d'être normalisées (*normalize*) dans l'espace standard commun du MNI. Les images normalisées ont ensuite été lissées (*smooth*) avec un filtre de 8 mm pour atténuer les différences anatomiques inter-individuelles.

IV. 3. 6. Considérations méthodologiques spécifiques à l'étude chez l'enfant

Dans ce travail de thèse, nous nous sommes interrogés sur l'état de maturation des réseaux sous-tendant la reconnaissance des interactions sociales. Ainsi nous souhaitons étudier le fonctionnement cérébral chez l'enfant au développement typique. Néanmoins,

nombre de facteurs vasculaires et physiologiques sont différents chez l'enfant par rapport à l'adulte. A titre d'exemples, les enfants ont un rythme cardiaque plus élevé que les adultes alors que la pression sanguine est plus faible, ce qui n'est pas sans conséquence sur le débit sanguin et par conséquent, sur le signal BOLD. De plus, les processus de myélinisation des neurones sont en cours alors que la densité synaptique est à son maximum (Nagy et al., 2004 ; Gaillard et al., 2001). Il apparaît donc nécessaire de comprendre l'influence de ces facteurs sur les aspects hémodynamiques du signal BOLD afin d'interpréter correctement les activations cérébrales obtenues dans les études chez l'enfant. En effet, comme nous l'avons souligné dans ce chapitre, le signal BOLD est une mesure indirecte de l'activité neuronale, corrélée à l'augmentation du débit sanguin cérébral et au rapport hémoglobine / désoxyhémoglobine. De plus, le modèle linéaire généralisé (GLM) fait le postulat que la réponse hémodynamique est linéaire, il s'agit donc d'un modèle « imparfait » qui ne prédit pas les changements du signal BOLD au cours de la vie.

La comparaison des données en neuro-imagerie sur le développement cognitif n'a de sens qu'à la condition que la réponse neurovasculaire soit équivalente chez l'enfant et l'adulte. En utilisant le principe du blocage respiratoire (de l'anglais, *breath holding*), il est possible de reproduire la cascade d'événements vasculaires qui conduit à l'augmentation du débit sanguin cérébral à l'image de ce qui se produit lors d'une activité cérébrale (Thomason et al., 2005). Les résultats confirment l'apparition précoce de la réponse hémodynamique chez l'enfant (Richter et Richter, 2003; Thomason et al., 2005). De plus, tout comme chez l'adulte, la réponse BOLD n'était pas homogène au sein de différentes régions cérébrales. Ainsi la réponse hémodynamique présente des caractéristiques communes indépendamment de l'âge : la comparaison est donc possible entre les groupes de sujets d'âges différents.

Outre les aspects hémodynamiques du signal BOLD, la morphologie du cerveau de l'enfant diffère en taille¹⁷ mais aussi en proportion de substances blanche et grise, de connexions neuronales et de densité synaptique (Caviness et al., 1996; Gaillard et al., 2001). Ces différences obligent donc à nous interroger sur le choix de l'espace standard commun (*template*) à utiliser pour normaliser les images anatomiques et fonctionnelles lors de l'étape de normalisation. Pour certains auteurs, il est nécessaire d'utiliser un *template* pédiatrique. En

¹⁷ La circonférence de la tête d'enfants âgés entre 7 et 11 ans est inférieure à celle d'un adulte d'environ 5 % (Caviness, et al., 1996).

effet, les distorsions induites par la normalisation au moyen d'un *template* adulte (voir section suivante sur la localisation anatomique) pourraient influencer l'analyse de groupes. Aussi la comparaison des régions activées entre les adultes et les enfants pourrait être faussée de plusieurs millimètres (Wilke et al., 2002; Yoon et al., 2009). Pour d'autres auteurs, la différence de taille du cerveau est négligeable à partir de l'âge de 6 ans et la forme globale de la réponse hémodynamique ainsi que la localisation fonctionnelle des régions activées sont semblables au sein de groupes d'enfants et d'adultes (Kang et al., 2003; Lenroot et Giedd, 2006). En outre, les différences des images anatomiques et fonctionnelles entre les groupes sont à interpréter en fonction de la résolution des images. En effet, les images fonctionnelles EPI sont habituellement acquises à une résolution équivalente à $3 \times 3 \times 3$ mm avec une épaisseur de coupe de l'ordre de 3 mm tandis que la résolution des images anatomiques est de $1 \times 1 \times 1$ mm. Aussi les transformations géométriques appliquées sur les images EPI et anatomiques dans l'espace commun ainsi que l'étape de lissage ne font qu'amoinrir les différences inter-individuelles et inter-groupes. De plus, une étude a montré que les erreurs liées à la normalisation spatiale sur un *template* adulte étaient plus importantes chez des enfants de moins de 6 ans. Cette étude conclut que l'utilisation du logiciel de traitement des images SPM peut néanmoins être utilisé dans des études en développement chez des enfants âgés de plus de 7 ans (Muzik et al., 2000).

A la lecture des différentes études et en relation avec l'âge moyen de nos sujets enfants (9,10 ans \pm 11 mois), nous avons choisi d'utiliser le *template* adulte pour effectuer l'étape de normalisation. Par ailleurs, ce choix nous permet par la suite de réaliser une comparaison directe entre le groupe des enfants et celui des adultes puisque la normalisation a été effectuée dans le même espace stéréotaxique.

IV. 4. Analyses par cartographie statistique paramétrée

Lors d'une acquisition en IRMf, la réponse hémodynamique induite par l'activation neuronale est mesurée au cours du temps dans chaque voxel du cerveau. L'activation cérébrale ainsi quantifiée reflète l'exécution par le sujet des différentes conditions comportementales du protocole expérimental.

IV. 4. 1. Spécification du modèle

Les analyses statistiques sont appliquées en utilisant la méthode d'analyse par cartographie statistique paramétrée (*statistical parameter map, SPM*). Cette méthode permet d'évaluer le risque pris en attribuant la modification du signal BOLD à la nature des conditions du protocole expérimental. Une des limites de la méthode de BOLD est de faire l'hypothèse que la réponse hémodynamique est linéaire c'est-à-dire qu'une activité cérébrale donnée entraîne la même augmentation de débit sanguin local, quel que soit le niveau de débit global et ceci sans tenir compte de la vascularisation cérébrale. Ainsi pour chaque condition expérimentale correspond une forme théorique de la réponse hémodynamique. Cette forme théorique est alors modélisée par une ou plusieurs fonctions temporelles appelées régresseurs. Dans nos études en IRMf, cinq régresseurs ont été modélisés par convolution de la réponse hémodynamique avec une condition expérimentale sur 3 s (de l'anglais, *box-car waveform*). Quatre régresseurs modélisaient les catégories IS et NIS et le mode de présentation Stick et Point, ils étaient considérés comme régresseur d'intérêt. Le cinquième régresseur modélisait la réponse motrice du sujet lorsqu'il appuyait sur la touche et était considéré comme un événement de non-intérêt. Ces régresseurs sont groupés dans une matrice appelée matrice de dessin expérimental. Pour traduire nos hypothèses sous forme mathématique quant à la forme des réponses du signal BOLD associées à chacune des conditions expérimentales, nous devons utiliser un modèle linéaire général (*general linear model, GLM*) (Friston et al., 2005). Le *GLM* est une généralisation du modèle de régression linéaire et a pour but de décomposer le signal BOLD mesuré comme suit :

$$Y = M + \beta_1 R_1 + \beta_2 R_2 + \dots + \beta_j R_j + E$$

Y est la valeur du signal mesuré dans le voxel étudié

M est la valeur moyenne du signal, qui s'écrit classiquement sous la forme $M = \beta_0 R_0$

R₀ est le régresseur constant

R₁, R₂... R_j sont les régresseurs choisis pour modéliser au mieux la réponse hémodynamique d'une condition expérimentale

β₁, β₂... β_j sont les coefficients multiplicatifs ou coefficients de régression

E est l'erreur résiduelle et correspond à la partie des données non expliquées par le modèle.

IV. 4. 2. Estimation des paramètres du modèle et des contrastes

Cette étape consiste à « ajuster » les données au modèle et à estimer la valeur des β associés à chacune des conditions expérimentales. En termes mathématiques, estimer le modèle consiste à effectuer pour chaque voxel une régression linéaire des données sur l'ensemble des régresseurs théoriques définis dans la matrice afin d'estimer les paramètres β qui minimisent la variance de l'erreur résiduelle. Chaque paramètre β reflète donc la contribution du régresseur associé à la variation du signal BOLD dans le voxel considéré : les β significativement différents de 0 correspondent aux régresseurs qui contribuent significativement à expliquer le signal dans le voxel.

Les régions activées sont celles dans lesquelles la variance liée aux conditions expérimentales d'intérêt est significativement plus forte que la variance liée au bruit. C'est donc un test F de Fisher qui est fait, automatiquement pendant l'estimation du modèle, en prenant comme seuil par défaut $p = 0,001$. En d'autre terme le test F teste, pour un voxel donné, la réduction de variance résiduelle apportée par l'incorporation des fonctions d'intérêt dans le modèle, et donc le fait que le niveau du facteur d'intérêt module de façon significative le signal dans ce voxel. Si le test F est significatif, on peut dire que le facteur « condition » a eu un effet sur le signal BOLD dans ce voxel, mais ce test ne permet pas de savoir quel type d'effet. Par exemple, les régions activées par la condition IS par rapport à la condition NIS sont celles dont le β correspondant est plus fort dans la condition IS. On peut comparer leurs variances respectives avec le test F ou leurs moyennes respectives avec un test t de *Student*. Les comparaisons de conditions sont appelées contrastes ; il s'agit d'une combinaison linéaire de paramètres β_j pour tester l'hypothèse nulle à laquelle on s'intéresse.

Ces opérations étant réalisées pour chaque voxel, le logiciel SPM utilise la théorie des champs gaussiens pour tenir compte des comparaisons multiples. La carte t est alors transformée en carte Z dans laquelle les foyers d'activation sont caractérisés par une étendue spatiale et une hauteur de pic (score Z). Ces cartes fournissent les scores des tests statistiques au sein de chaque voxel. A chaque voxel est associé un point de coordonnées (x, y, z) qui définit sa localisation dans l'espace tridimensionnel du MNI. Ainsi les cartes statistiques données par le logiciel SPM représentent les régions montrant des différences positives du signal entre les deux conditions comparées. C'est ce type de combinaison linéaire (ou contraste) que nous avons utilisé dans les deux études en IRMf de cette thèse. Le niveau de risque accepté pour affirmer un effet est choisi par l'expérimentateur sachant qu'un seuil de

significativité haut minimise le risque de faux positifs (risque β de première espèce), mais augmente le risque des faux négatifs (risque β de deuxième espèce). De façon générale, un seuil de significativité égal à $p = 0,05$ sur le volume analysé, après correction pour les comparaisons multiples, est utilisé. A titre d'exemples, un seuil corrigé à $p = 0,05$ correspond à 5 chances sur 100 d'activer un seul voxel par hasard tandis qu'un seuil non corrigé à $p = 0,05$ correspond à activer par hasard 5 % du cerveau.

Concernant les analyses de groupes, nous avons choisi l'approche par effet aléatoire (*random effect analysis, RFX*) qui considère les sujets comme une variable aléatoire choisie au hasard dans la population. Dans ce cas, l'analyse comporte deux niveaux, d'une part les analyses individuelles à partir desquelles sont obtenues autant de contrastes T d'intérêt que de sujets dans l'échantillon, d'autre part l'analyse de groupe en tant que telle, qui inclut les contrastes T préalablement définis et pour laquelle l'erreur est estimée à partir de la variabilité interindividuelle. Ainsi, cette analyse permet théoriquement l'extrapolation des résultats à la population (Friston et al., 2002). Une correction pour comparaisons multiples a été appliquée aux statistiques obtenues (FDR, de l'anglais, *false discovery rate*).

Chez l'enfant, nous avons utilisé différents types de corrections en fonction d'hypothèses définies *a priori*. Pour certaines régions dont la valeur statistique du p n'était pas significative après FDR, nous avons effectué une correction pour comparaisons multiples (SVC) en utilisant une sphère de diamètre 10mm à partir du pic d'activité (ce qui signifie que la correction pour comparaisons multiples ne s'effectue que dans la région d'intérêt ainsi déterminée), sur la base d'une hypothèse anatomique *a priori*, définie à partir des activations obtenues dans l'étude précédente chez l'adulte. Ces régions sont :

- le cortex préfrontal médian (dorsal)
- le gyrus fusiforme (FBA)
- le sillon intra-pariétal

Enfin, la correction FDR étant particulièrement conservatrice, il nous a semblé intéressant de mentionner certaines régions dont la variation d'activité semblait pertinente, pour $p < 0,001$ non corrigé.

Afin de tester un effet développemental au sein du groupe des enfants, nous avons utilisé une analyse de régression qui vise à identifier, pour un contraste donné, les régions dont les variations d'activité sont influencées par l'ajout d'un régresseur, en l'occurrence ici l'âge des enfants. Cette analyse est à double sens : elle permet de mettre en évidence une

régression positive (augmentation de l'activité avec l'accroissement du régresseur « âge ») et une régression négative (diminution de l'activité avec l'accroissement du régresseur « âge »).

Afin d'effectuer une comparaison inter-groupes, nous avons utilisé un test t de Student pour comparer deux échantillons issus de populations indépendantes, en utilisant les cartes statistiques obtenues pour le contraste IS > NIS dans chacun des deux groupes (*two-sample t-test* implémenté dans SPM).

😊 En pratique ...

Les analyses statistiques sont appliquées en utilisant la méthode SPM. Cette méthode fait l'hypothèse que la réponse hémodynamique est linéaire c'est-à-dire qu'une activité cérébrale donnée entraîne la même augmentation de débit sanguin. Pour chaque condition expérimentale correspond une forme théorique de la réponse hémodynamique qui est modélisée par une ou plusieurs régresseurs. Dans nos études en IRMf, quatre régresseurs d'intérêt ont été modélisés pour les catégories (IS et NIS) et les modes de présentation (Stick et Point) et un cinquième régresseur de non-intérêt modélisait la réponse motrice du sujet. Nous avons utilisé un modèle linéaire général (GLM) qui permet de décomposer le signal BOLD. Nous avons estimé la valeur des β associés à chacune des conditions expérimentales. Par exemple, les régions activées par la condition IS par rapport à la condition NIS (contraste) sont celles dont le β correspondant est plus fort dans la condition IS. Concernant les analyses de groupes, nous avons choisi l'approche par effet aléatoire qui permet d'extrapoler les résultats à la population générale.

IV. 5. Localisations anatomiques

Il n'existe pas une méthode standard de description de la localisation d'une activation cérébrale mais plusieurs méthodes. L'utilisation de l'atlas anatomique proposé par Talairach et Tournoux est une de ces méthodes (Talairach et Tournoux, 1988). Cet atlas se place dans un référentiel stéréotaxique où une activation cérébrale peut être repérée avec des coordonnées dans les trois plans de l'espace. Bien que très utilisé dans la communauté des neuro-imageurs, cet atlas n'a été établi qu'à partir de l'observation *post-mortem* de l'hémisphère droit d'un seul individu et la taille du référentiel qu'il a permis de définir s'est avérée plus petite que la taille moyenne des cerveaux actuels. La normalisation des données

comme nous l'avons vu précédemment est plus fréquemment réalisée à partir du référentiel du *MNI*, plus représentatif de la population humaine puisqu'il a été élaboré en tenant compte de 152 cerveaux.

Une autre méthode de localisation consiste à repérer l'activation cérébrale selon des critères morphologiques tels que la position des gyri et des sillons. C'est cette méthode de localisation anatomique que nous avons utilisée dans nos études pour définir les régions activées, communes à tous les sujets du groupe. L'atlas de Duvernoy (Duvernoy, 1999) est utilisé pour ce type de repérage. Il porte sur l'anatomie des hémisphères et du diencephale (thalamus et hypothalamus) et s'attache à donner une vue synthétique de l'anatomie dans les plans coronal, sagittal et horizontal à partir de photos de cerveaux obtenus par dissection, accompagnées de légendes et de textes explicatifs. Cet atlas propose également des coupes acquises en IRM correspondant aux photographies. Des informations concernant la vascularisation du cerveau complètent la seconde édition de cet ouvrage.

Néanmoins certaines régions d'activation n'ont pas été identifiées sur la seule base de repères anatomiques. En effet, la proximité anatomique ne permet pas toujours de distinguer clairement certaines régions. Dans de tels cas, les auteurs définissent ces régions plutôt sur des aspects fonctionnels démontrés dans la littérature. Cela a été, par exemple, le cas pour le sillon temporal supérieur (STS) dans sa partie postérieure et la jonction temporo-pariétale (JTP). Nous avons choisi de distinguer ces deux régions car elles sous-tendaient des traitements distincts dans notre étude (détection de l'agentivité et de l'intentionnalité pour le STS ; implication dans la compréhension de scènes d'interaction sociale pour la JTP). Il existe également des régions qui sont identifiées dans une région anatomique élargie mais pour lesquelles un consensus scientifique a permis de les nommer fonctionnellement. C'est par exemple le cas d'une région située dans le gyrus temporal médian (*middle temporal gyrus*) appelée EBA (*Extrastriate Body Area*) en raison de son rôle dans la perception visuelle de l'image de corps humain. Dans notre étude chez l'adulte, nous n'avions pas d'hypothèse *a priori* sur cette région que nous avons identifiée grâce à la comparaison des coordonnées du pic maximum d'activation à celles d'activations de différentes études sur la perception du corps (Downing, et al., 2001; Peelen et Downing, 2005; Peelen et Downing, 2007). De façon générale, nous avons comparé les régions activées à celles de la littérature.

RESULTATS EXPERIMENTAUX

I. RECONNAISSANCE DES INTERACTIONS SOCIALES AU COURS DU DEVELOPPEMENT

I. 1. Questions posées

L'enfant est un être éminemment social dont le corps en action est le premier langage pour communiquer avec son entourage. Très jeune, avant même l'apparition du langage, l'enfant sait utiliser l'information portée par le mouvement pour comprendre le but d'une action et l'utiliser dans un contexte social (Onishi et Baillargeon, 2005; Warneken et Tomasello, 2006; Southgate et al., 2007). Cette étude, qui constitue la référence à partir de laquelle l'étude chez l'enfant avec autisme a été conçue, a pour but d'étudier les compétences dont disposent les jeunes enfants au développement typique pour dégager un contenu social au moyen de la seule information du corps en mouvement et ainsi catégoriser des MH engagés ou non dans des interactions sociales.

Nous avons fait l'hypothèse qu'aux âges les plus jeunes que nous puissions interroger, la capacité à catégoriser des scènes en fonction de la présence ou de l'absence d'un contenu social sur la base de l'observation de l'action était déjà présente. En effet, avant l'âge de deux ans, les enfants sont capables d'utiliser les informations issues du mouvement pour prédire le comportement d'autrui (Onishi et Baillargeon, 2005), pour comprendre la finalité d'une action qu'ils observent (Warneken et Tomasello, 2006) et pour anticiper les intentions d'autrui (Southgate et al., 2007). En revanche, nous avons souhaité déterminer à partir de quel âge cette capacité s'exprimait au travers d'une analyse suffisamment fine pour permettre à un enfant d'obtenir des performances comparables à celles d'un adulte. En d'autres termes, c'est la question de la maturation de la compréhension de l'action au service de la cognition sociale qui est posée dans cette étude. Les enfants les plus jeunes inclus dans cette étude étaient âgés de quatre ans. Ce choix a été motivé par la nécessité qu'ils comprennent la consigne verbale pour réaliser l'épreuve de reconnaissance. Afin d'étudier l'évolution de la capacité à catégoriser des interactions sociales à partir du corps en mouvement, nous avons enregistré des enfants jusqu'à l'âge de dix ans ainsi que des adultes à titre de contrôle.

Présenté sous la forme de points lumineux, le mouvement humain pour être reconnu nécessite l'extraction d'une forme humaine globale. Cette étape semble immédiate chez

l'adulte. Néanmoins, chez l'enfant se pose la question d'un éventuel bénéfice tiré d'une présentation du MH sous forme plus reconstruite (points lumineux reliés entre eux par des bâtonnets ou stick) pour reconnaître des actions complexes. Afin de tester cette hypothèse, les stimuli des deux catégories (IS et NIS) ont été déclinés en deux modes de présentation (points ou stick).

I. 2. Résultats

I. 2. 1. Profil des réponses au cours de l'épreuve

Afin de caractériser le comportement des sujets, nous avons dans un premier temps évalué leur « profil de réponses ». Nous avons ainsi comptabilisé le nombre d'essais pour lesquels les sujets n'avaient pas donné de réponse, avaient donné une réponse anticipée, avaient produit une réponse incorrecte et avaient donné la réponse correcte. Ces profils de réponses sont présentés dans la Figure 19.

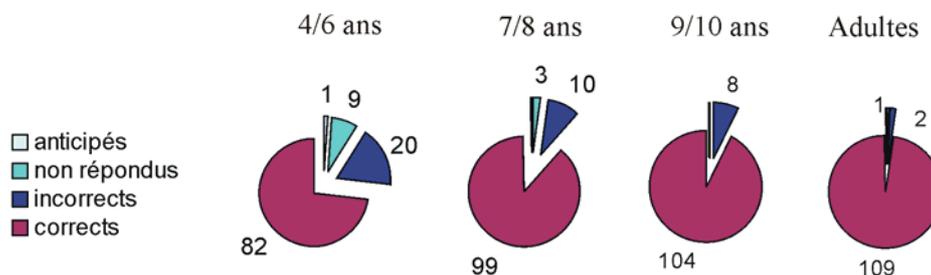


Figure 19 : Profil des réponses obtenues au cours de l'épreuve exprimé en nombre de réponses, en fonction du type de comportement, indépendamment de la catégorie et du mode de présentation, sur l'ensemble des 112 essais proposés.

Les profils obtenus indiquent que le nombre d'essais anticipés est négligeable voire nul pour les quatre groupes d'âge. Le nombre d'essais non répondus diminue avec l'âge et représente 8 % (9 / 112) des essais chez les enfants de 4 / 6 ans et 3 % (3 / 112) des essais chez les enfants de 7 / 8. Tous les enfants, même les plus jeunes ont donc participé activement à l'épreuve.

Le nombre d'essais corrects ne cesse d'augmenter avec l'âge. Il s'élève à 73 % (82 / 112) chez les plus jeunes enfants et passe de 88 % (99 / 112) dans le groupe 7 / 8 ans à 93 %

(104 / 112) dans le groupe 9 / 10 ans pour finir à 97 % (109 / 112) chez les adultes. Dès l'âge de quatre ans, les enfants réussissent bien l'épreuve : leurs performances sont largement au-dessus d'un seuil de performance lié au hasard.

I. 2. 2. Effet de la catégorie : IS versus NIS ?

Quatre sessions composées des IS et des NIS ont été proposées à tous nos sujets. Nous avons comparé le nombre de réponses correctes en fonction du groupe d'âge, par catégorie, afin d'évaluer le développement des capacités de reconnaissance des IS et des NIS.

Sur 56 essais proposés en IS et 56 essais proposés en NIS, la moitié des enfants (médiane) du groupe 4 / 6 ans répondent correctement à 38 essais en IS (Q1 : 30 – Q3 : 43) et 48 essais en NIS (Q1 : 39 – Q3 : 52). La moitié des enfants du groupe 7 / 8 ans répondent correctement à 51 essais en IS (Q1 : 37 – Q3 : 54) et 54 essais en NIS (Q1 : 53 – Q3 : 55). La moitié des enfants du groupe 9 / 10 ans répondent correctement à 52 essais en IS (Q1 : 46 – Q3 : 53) et 53 essais en NIS (Q1 : 52 – Q3 : 55). La moitié des adultes répondent correctement à 55 essais en IS (Q1 : 52 – Q3 : 56) et 55 essais en NIS (Q1 : 54 – Q3 : 56).

Les résultats mettent en évidence un effet significatif pour chacun des deux facteurs principaux à savoir « catégorie » ($F_{1,44} = 22,598$ avec $\alpha < 0,001$) et « groupe » ($F_{3,44} = 15,691$ avec $\alpha < 0,001$). En d'autres termes, la performance à cette épreuve est dépendante de la catégorie mais aussi de l'âge des sujets. Ainsi, les enfants réussissent plus ou moins bien l'épreuve en fonction de leur âge et leurs performances varient selon qu'une scène sociale ou non sociale est proposée. Par ailleurs, une interaction entre ces deux facteurs apparaît à la limite de la significativité ($F_{3,44} = 2,828$ avec $\alpha = 0,049$). Nous avons néanmoins considéré cette interaction comme non significative, dans la mesure où la distribution de la variable aléatoire s'écarte de la normalité et que l'égalité des variances n'est pas obtenue. Sur ces considérations, nous ne pouvons pas affirmer qu'il existe une relation entre le facteur « groupe » et le facteur « catégorie ».

I. 2. 2. 1. A partir de quel l'âge une IS (ou une NIS) est-elle aussi bien reconnue qu'à l'âge adulte ?

L'analyse précédente indique des effets significatifs pour chacun des deux facteurs. Par conséquent, nous approfondissons l'analyse des données expérimentales pour explorer à

partir de quel âge une catégorie particulière d'animations (IS ou NIS) est aussi bien reconnue par les enfants que par les adultes.

Pour la catégorie IS, les résultats sont illustrés dans la Figure 20-A et montrent que le nombre de réponses n'est pas le même sur l'ensemble des groupes d'âge ($\alpha < 0,001$). Les performances dans le groupe 4 / 6 ans sont significativement inférieures à celles du groupe 9 / 10 ans ($\alpha < 0,05$) et celles du groupe adulte ($\alpha < 0,01$). Les performances ne sont pas significativement différentes entre les groupes âgés de 4 / 6 ans et de 7 / 8 ans. A partir de 7 / 8 ans, les enfants reconnaissent une scène sociale aussi bien que les adultes.

Pour la catégorie NIS, les résultats sont illustrés dans la Figure 20-B et montrent que le nombre de réponses n'est pas le même sur l'ensemble des groupes d'âge ($\alpha < 0,001$). Les performances dans le groupe 4 / 6 ans sont significativement inférieures à celles des groupes 7 / 8 ans ($\alpha < 0,05$) et 9 / 10 ans ($\alpha < 0,05$) ainsi celles du groupe adulte ($\alpha < 0,01$). A partir de 7 / 8 ans, il n'y a plus de différence par rapport aux groupes plus âgés.

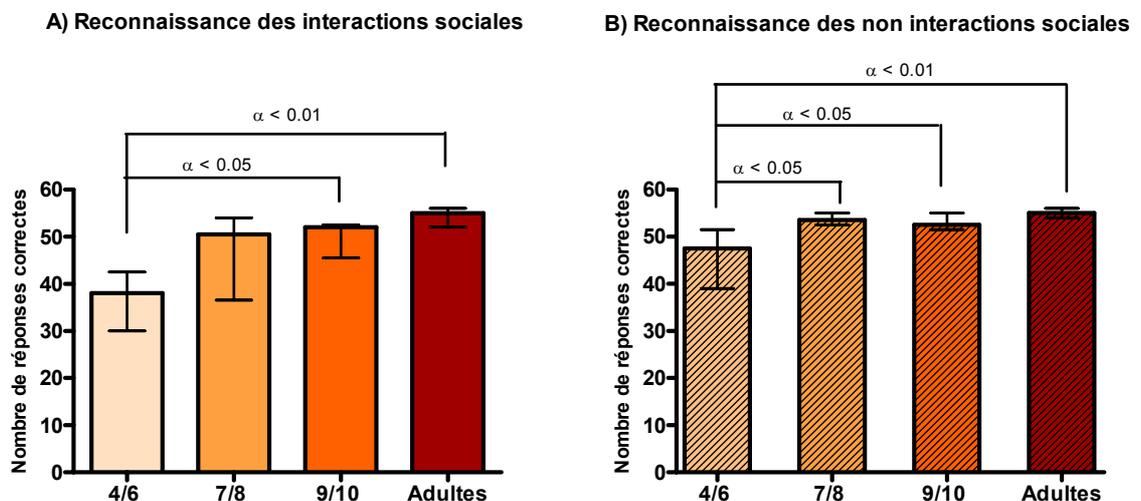


Figure 20 : Histogrammes illustrant l'effet développemental quel que soit le mode de présentation pour reconnaître une interaction sociale (A) ou une non-interaction sociale (B).

I. 2. 2. 2. A un âge donné, les enfants reconnaissent-ils mieux IS ou NIS ?

Les enfants de 4 / 6 ans reconnaissent moins bien que les enfants plus âgés une IS et une NIS. Nous cherchons à évaluer si les enfants d'un même groupe d'âge sont meilleurs pour

reconnaître une scène sociale ou une scène non sociale. Les résultats illustrés dans la Figure 21 montrent un effet significatif pour le groupe 4 / 6 ans ($\alpha = 0,012$) et pour le groupe 7 / 8 ans ($\alpha = 0,021$). En d'autres termes, les enfants de ces deux groupes catégorisent mieux une NIS qu'une IS. Aucun effet n'est observé pour les groupes des enfants âgés de neuf et dix ans ainsi que le groupe d'adultes : ils reconnaissent aussi bien une IS qu'une NIS.

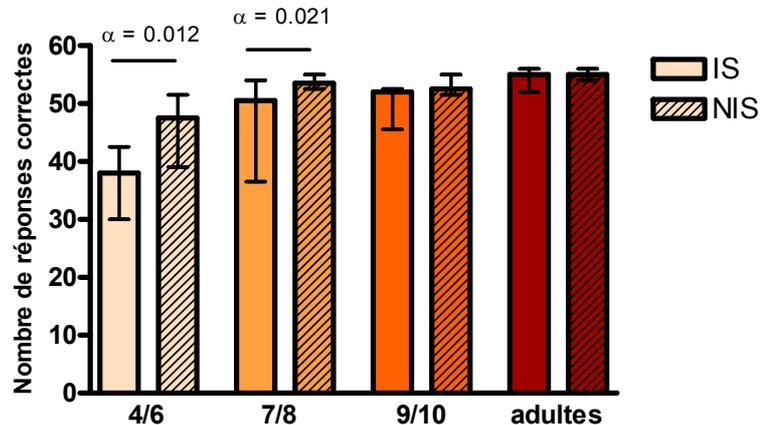


Figure 21 : Histogrammes illustrant le nombre moyen de réponses correctes par catégorie quel que soit le mode de présentation pour chacun des groupes d'âges : 4 / 6 ans, 7 / 8 ans, 9 / 10 ans et adultes.

I. 2. 3. Effet du mode de présentation : stick *versus* point ?

Les animations, qu'elles soient sociales ou non sociales, ont été présentées de deux façons différentes : en point ou en stick. Nous avons évalué si le mode de présentation avait une influence sur la performance des enfants. Afin de tester cet effet, nous avons groupé le nombre de réponses correctes correspondant aux IS ainsi qu'aux NIS selon le mode de présentation proposé.

Sur 56 essais proposés en point et 56 essais proposés en stick, les enfants du groupe 4 / 6 ans répondent correctement à 41 ± 6 essais en stick et 40 ± 7 essais en point. Les enfants du groupe 7 / 8 ans répondent correctement à 49 ± 7 essais en stick et 49 ± 7 essais en point. Les enfants du groupe 9 / 10 ans répondent correctement à 51 ± 4 essais en stick et 51 ± 4 essais en point. Les adultes répondent correctement à 54 ± 2 essais en stick et 55 ± 1 essais en point.

Nous avons analysé les facteurs « groupe » et « mode de présentation ». Nous obtenons un effet significatif pour le facteur principal « groupe » ($F_{3, 44} = 16,447$ avec $\alpha < 0,001$) qui se traduit par une performance générale des enfants de 4 / 6 ans moins efficace que

celle des autres groupes ($\alpha < 0,01$). De plus, la performance des enfants du groupe 7 / 8 ans est également moins efficace que celle du groupe des adultes ($\alpha < 0,05$). Ces résultats corroborent les effets développementaux décrits précédemment. Cependant, nous n'avons trouvé aucun effet significatif pour le facteur « mode de présentation », ce qui indique que les performances ne sont pas influencées par le mode de présentation. En d'autres termes, le mode de présentation en stick n'aide pas les enfants, quel que soit leur âge, à améliorer leur performance lors de la reconnaissance d'une animation.

I. 2. 4. Description qualitative des IS reconnues ou non reconnues

Nous avons présenté dans le Tableau 4 les IS qui sont reconnues par tous les enfants âgés de quatre à six ans (12 / 12) ou au contraire celles qui sont difficilement reconnues (moins de six enfants sur 12).

Nombre d'enfants	Nature des IS	Conventions sociales	Situations émotionnelles	Jeux / sports collectifs	Indices spatio-temporels forts
12/12	Se faire gronder		oui		proximité
12/12	Partager sa joie		oui		proximité
12/12	Montrer quelque chose en bas	oui			proximité
12/12	Se serrer la main	oui			contact
12/12	Etre rattrapé lors d'une chute	oui			contact
12/12	Jeux de mains enfantins			oui	contact
12/12	Etre heureux de se retrouver		oui		proximité
[...]					
6/12	Montrer quelque chose en bas (face à face)	oui			proximité
5/12	Se faire gronder (face à face)		oui		proximité
4/12	Se faire renvoyer		oui		
4/12	Jouer au football			oui	
4/12	Montrer quelque chose en haut	oui			

Tableau 4 : Natures des IS que tous les enfants (12 / 12) de 4 à 6 ans reconnaissent et celles dont moins de la moitié (entre 6 / 12 et 4 / 12) des enfants reconnaissent. Ces IS sont classées selon les trois nuances sociales : conventions sociales, situations émotionnelles et jeux / sports collectifs. Les indices visuo-spatiaux désignent la « proximité » ou rapprochement physique ainsi que le « contact » ou toucher entre les deux acteurs de la scène.

A titre d'exemple, des situations émotionnelles comme « Se faire gronder » et « Partager sa joie » ou des scènes codifiées socialement telles que « Se serrer la main » sont catégorisées en IS par tous les enfants entre quatre et six ans. Il est intéressant de noter qu'une IS comme celle intitulée « Jeux de mains enfantins » est également reconnue par tous les enfants. Cette scène concerne particulièrement les jeunes enfants qui se prêtent souvent à ces jeux avec un autre camarade. Il semblerait que les IS les mieux reconnues sont celles que les enfants expérimentent dans leur vie quotidienne. En revanche, des IS comme « Se faire renvoyer » sont difficilement reconnues par les jeunes enfants. Nous pouvons émettre l'hypothèse qu'une telle scène n'est pas encore ou peu « vécue » par ces enfants qui, de fait, ne la reconnaissent pas de façon évidente.

Par ailleurs ces informations qualitatives suggèrent que les enfants de ce groupe d'âge s'appuient sur des indices spatio-temporels pour réussir l'épreuve de catégorisation. En effet, les IS bien reconnues sont souvent caractérisées par des rapprochements physiques voire des contacts entre les deux acteurs. D'autre part, la scène de football est peu reconnue, probablement parce que l'absence d'un ballon visible limite l'accès au sens de la scène pour de jeunes enfants. Enfin, l'IS « Se faire gronder » est bien reconnue lorsque les acteurs sont vus en trois quart alors qu'elle l'est difficilement lorsque les acteurs sont face à face. Ainsi la perspective semble influencer les réponses des enfants, ce qui souligne une nouvelle fois l'importance des indices visuels.

😊 Récapitulatif...

1- De façon générale, il existe un effet développemental principalement dû aux performances significativement moins élevées des enfants les plus jeunes, pour les deux catégories d'items présentés. Les capacités de reconnaissance sont comparables à celles de l'adulte dès 7 / 8 ans. Ces différences traduisent une sous-estimation du caractère social des scènes présentées puisque jusqu'à l'âge de huit ans, les enfants reconnaissent plus facilement une scène non sociale qu'une scène sociale.

2- Le mode de présentation n'a pas d'influence sur la performance quel que soit l'âge des enfants. Les enfants sont aussi performants pour reconnaître du MH complexe qu'il soit présenté en point ou en stick.

I. 3. Discussion

Un accès précoce à l'état mental de l'autre

Dès 15 mois, les enfants possèdent une théorie de l'esprit qui leur permet de se représenter les croyances d'autrui sous une forme rudimentaire. Sur la base de cette croyance, ils peuvent alors prédire le comportement d'un acteur (Onishi et Baillargeon, 2005; Southgate et al, 2007). De façon fine, ils utilisent des indices contextuels pour deviner les caractéristiques de l'action à venir en fonction de l'intention de l'acteur (Song et Baillargeon, 2007). Enfin, ils se servent de leur compréhension du but de l'acteur pour adapter un comportement altruiste d'aide, qui signe déjà un comportement social élaboré (Warneken et Tomasello, 2006). Plus tard, il a été montré qu'aux alentours de quatre ans, les enfants comprennent que le comportement d'autrui peut être guidé par un état mental qui diffère des actes observables (fausses croyances, mensonge), et que les représentations d'autrui ne reflètent pas nécessairement la réalité, ni leurs propres représentations (Wimmer et Perner, 1983; Baron-Cohen et al., 1985). Ainsi, il apparaît que l'utilisation d'une théorie de l'esprit est présente très tôt chez l'enfant. Elle lui permet certainement d'analyser le but de l'action réalisée par l'autre jusqu'à l'utiliser dans un contexte social. Le développement de cette capacité semble essentiel. Il y a donc tout lieu de penser qu'aux âges que nous interrogeons, l'utilisation d'une théorie de l'esprit permet aux enfants d'avoir accès à l'état mental de chacun des deux acteurs qu'il voit interagir, afin de prédire l'action qui les lie. Néanmoins, il est probable qu'un affinement de cette capacité à discerner le but d'une action en utilisant une représentation mentale s'effectue tout au long de l'enfance (et même au-delà), sur la base de l'enrichissement que procure la multiplicité des interactions sociales que chacun rencontre.

Compréhension sociale et langage

Bien qu'entre quatre et six ans, les enfants de notre étude présentent un niveau de langage avancé, nous pouvons néanmoins nous interroger sur la relation entre expérience / compréhension sociales et attribution du vocabulaire associé. La problématique du langage et la compréhension d'autrui est encore à ce jour sujet à controverse (pour revue, voir de Villiers, 2007).

Les études chez des enfants atteints de surdité soulignent l'importance du langage qu'il soit parlé ou signé dans le développement de la communication et des habilités sociales. Chez des enfants sourds, une corrélation a été mise en évidence entre un retard dans l'acquisition de la langue des signes et des difficultés dans l'épreuve de fausses croyances (Schick et al., 2007). Ce retard est d'autant plus marqué chez des enfants dont les parents sont entendants (ne partageant pas le même moyen de communication) alors que les enfants dont les parents sont également sourds ont des performances équivalentes à des enfants de développement typique (Schick et al., 2007). Les enfants présentant une surdité compensée par un implant cochléaire utilisent mieux le langage si l'opération a été réalisée au moment de l'acquisition du langage. De surcroît, leurs compétences langagières semblent contribuer à une meilleure capacité d'attribution d'intention, comparables à des enfants de développement typique (Rommel et Peters, 2009).

Les capacités à comprendre autrui chez des enfants de développement typique âgés entre quatre et cinq ans sont influencées par le vocabulaire qu'utilisent leurs parents. Plus les parents font référence à des mots décrivant les états mentaux, meilleures sont les performances des enfants dans des épreuves de fausses croyances (Adrian et al., 2005). Lors de nos études pilotes, nous avons demandé aux plus jeunes enfants de décrire les IS. Les enfants avaient souvent recours à l'imitation (« il fait comme ça ») et lorsqu'ils utilisaient du vocabulaire, il était souvent descriptif (« ils tendent tous les deux les bras devant ») et ne renseignait pas directement sur le contenu social. Dans notre étude, nous n'avons pas évalué le niveau linguistique des enfants participants. Il serait cependant intéressant d'approfondir cet aspect afin de corréler la richesse du vocabulaire, l'expérience sociale et la compréhension des IS.

Cependant, nous retiendrons de ces études que le langage améliore la compréhension des intentions et des états mentaux d'autrui. Toutefois, les études chez les enfants dont la production langagière est à ses balbutiements (avant deux ans) montrent que la compréhension des intentions d'autrui est déjà efficace (Onishi et Baillargeon, 2005; Warneken et Tomasello, 2006; Southgate et al., 2007). Ces travaux soulignent donc que les enfants développent des aptitudes cognitives et sociales bien avant qu'ils n'acquièrent des compétences langagières sophistiquées.

Développement des compétences de catégorisation

La contribution du langage dans la compréhension du comportement d'autrui relève probablement du lien qui s'établit entre ce qui est observé (l'action, l'interaction) et le concept (« étiquette sémantique ») qui s'y rattache. Dans le cadre de notre étude, nous avons volontairement limité l'information aux seuls mouvements du corps en supprimant toutes informations relatives au langage verbal. Cependant, reste le questionnement sur la stratégie utilisée par les enfants pour catégoriser les animations. En effet, le modèle du MH repose sur une configuration spatio-temporelle de points formant un ensemble. C'est sur la base de ces caractéristiques minimalistes que le système visuel reconstruit une forme humaine. Ainsi la catégorisation repose-t-elle sur des indices visuo-spatiaux tels que la synchronie des mouvements ou sur des indices sémantiques tels que la reconnaissance d'un type précis d'IS qui permet de classer dans la famille « faire ensemble » ?

Une étude récente en développement s'intéressant aux compétences de catégorisation apporte des éléments de réflexion (Maintenant et Blaye, 2008). Des enfants âgés entre trois et huit ans ont apparié des images sur des critères perceptifs (même forme ou même couleur), des critères thématiques (objets de natures différentes mais que l'on rencontre ensemble comme chien-laisse ou clou-marteau) et des critères taxonomiques (objets de même sorte, de même famille comme animaux, vêtements). Les résultats montrent que les enfants entre trois et six ans développent la capacité à conceptualiser en fonction des relations perceptives (3 / 4 ans) et thématiques (5 / 6 ans). Ce n'est qu'autour de huit ans que les enfants réussissent à catégoriser selon des critères taxonomiques.

A la lumière de cette étude et en considérant que les enfants de quatre à six ans reconnaissent plus facilement des IS à forts indices visuo-spatiaux (rapprochement et contact physiques entre les acteurs), nous pouvons émettre l'hypothèse qu'une stratégie perceptive est vraisemblablement utilisée chez les plus jeunes enfants. D'autre part, si à partir de huit ans les enfants catégorisent en fonction d'un concept commun, nous pouvons supposer qu'ils ont accès au contenu social pour classer l'IS dans la famille de « faire ensemble ». Une étude en oculométrie est actuellement en cours sur les animations que nous avons élaborées (Communication affichée, Roche et al., 2009). Cette technique est prometteuse puisqu'elle ouvre des perspectives sur le type de stratégies d'exploration oculaire utilisées par les enfants pour « décoder » les scènes sociales et non sociales. Ainsi ces nouveaux résultats seront des

arguments précieux pour nous aider à élucider le développement des mécanismes de catégorisation chez l'enfant.

Représentations sociales et représentations de l'action : le rôle de l'expérience vécue

Plus les échanges sociaux deviennent sophistiqués, plus les représentations de l'action s'affinent. L'enfant interagit avec autrui et enrichit ainsi son répertoire moteur et social. Dans notre étude, observer des IS illustrées par la seule composante du corps en mouvement sollicite aussi des représentations de l'action. Pour construire les représentations de l'action, il est nécessaire d'avoir une représentation de soi, du monde extérieur et de leurs interactions réciproques. Les représentations du schéma corporel et de l'image de soi se construisent peu à peu à partir de l'action de l'enfant, de ses apprentissages de nouvelles habiletés et de ses adaptations successives à de nouvelles contraintes internes qui se produisent tout au long de l'ontogénèse (Assaiante, 2000 ; Assaiante et al., 2005). Certaines IS n'appartiennent probablement pas encore au répertoire moteur et social des enfants. Ainsi ces scènes sociales ne font pas encore appel aux représentations de l'action que l'enfant a construites.

En effet, nous avons observé que les IS les mieux reconnues par les enfants de quatre à six ans illustrent des scènes dans lesquelles ils sont fréquemment engagés dans leur vie quotidienne. Cette expérience sociale aiderait les enfants à reconnaître une IS présentée par le corps en mouvement. La psychologie du développement propose l'existence d'un lien entre la compréhension de l'action et l'expérience. Le nourrisson de trois mois est sensible au but d'une action qu'il observe (mouvement d'atteinte vers un objet) d'autant plus s'il a une expérience vécue de cette action (Sommerville et al., 2005). Ce couplage de la perception et de l'action repose sur l'activité du mécanisme miroir qui est plus fortement sollicité lorsque le nourrisson de 14 / 16 mois observe un autre nourrisson effectuer une action qu'il sait lui-même réaliser comme la marche à quatre pattes (van Elk et al., 2008).

Les représentations de l'action ne sont pas innées et nécessitent un temps de maturation assez long au cours de l'enfance (Forssberg et al., 1991; Assaiante et al., 2000; Schmitz et al., 2002). Au grès de ses expériences sensorimotrices et de ses interactions avec l'environnement, l'enfant ne cesse de construire et d'utiliser des représentations de l'action pour augmenter son répertoire moteur. Ces représentations lui permettent de comprendre un acte moteur dont il est acteur ou observateur en tenant compte de ses compétences et des

contraintes de l'environnement. Les représentations de l'action s'adaptent et s'enrichissent tout au long de la vie. Entre quatre et huit ans, les caractéristiques fines du contrôle anticipé de l'action sont immatures, suggérant que les représentations de l'action sont encore imparfaitement construites (Schmitz et al., 2002). A l'adolescence, le corps connaît de profonds changements de poids, de taille, de musculature qui contraignent les mécanismes centraux à prendre en compte ces modifications physiques pour le contrôle de l'action et de ses représentations (Choudhury et al., 2007; Viel et al., 2009).

Représentation de l'action et simulation motrice : une étape vers la compréhension des IS

Pour construire des « représentations sociales de l'action », l'enfant tire bénéfice de l'expérience liée à l'observation d'une action mais également de sa propre expérience en tant qu'agent. Les représentations partagées entre soi et autrui permettent un apprentissage bidirectionnel dans le sens où l'enfant comprend les actions d'autrui grâce à son expérience mais apprend aussi les conséquences d'une nouvelle action en observant une personne qui la réalise (Meltzoff, 2007).

Entre quatre et six ans, l'enfant investit les potentialités de son corps en tant qu'agent interagissant avec autrui. Il s'exerce, notamment par l'imitation, à entrer en relation avec ses pairs et à réagir à leurs comportements en retour. Ces échanges sociaux contribuent à élargir son expérience motrice et sociale. Grâce à cette expérience, il développe son répertoire moteur et social qui nourrit sans cesse les représentations internes. Nous proposons l'idée qu'au fil de ses expériences, l'enfant affine les représentations de l'action. Dans cette période développementale, l'enfant découvre également les possibilités sémantiques offertes par le langage verbal ce qui participe d'autant plus à affiner les représentations de l'action.

Si pour certains auteurs, le langage permet de se représenter les états mentaux en rendant opérante la pensée réflexive, nous soutenons que le langage corporel renseigne également sur les intentions et les états mentaux d'autrui et s'enrichit d'autant plus que le langage verbal apparaît. Le mécanisme miroir, par ses caractéristiques réflexives entre ses propres actions et celles d'autrui, ne sert que davantage la compréhension sociale et ce, très tôt au cours du développement.

En conclusion, à la lumière de nos résultats, nous proposons que les enfants entre quatre et six ans ont une expérience sociale et motrice qui, quoique très présente dans leur quotidien, est encore « pauvre » et des représentations de l'action à construire. Pour

comprendre autrui sur la base du mouvement du corps, l'enfant a recours aux représentations qu'il a élaborées sur la base de son expérience. Toutefois, le « répertoire moteur et social » de l'enfant s'enrichit progressivement en synergie avec l'acquisition du langage, ce qui résulte en une analyse plus fine des comportements d'autrui, en particulier des interactions sociales. Nous faisons l'hypothèse que le mécanisme miroir qui s'appuie sur les représentations de l'action pourrait être présent très tôt au cours du développement. Une activité fronto-pariétale a d'ailleurs été mise en évidence chez le nourrisson âgé d'à peine six mois lorsqu'il observe des actions dirigées vers un but (Nystrom, 2008b). L'expérience solliciterait ainsi ce mécanisme en stimulant ces propriétés notamment dans la compréhension des actions intentionnelles réalisées par autrui.

II. CAPACITE DE RECONNAISSANCE DES INTERACTIONS SOCIALES CHEZ DES ENFANTS AVEC AUTISME

II. 1. Questions posées

La littérature actuelle concernant la perception du MH dans l'autisme reste encore controversée (Blake et al., 2003 ; Hubert et al., 2007; Parron et al., 2008; Murphy et al., 2008). Pour certains auteurs, la perception du MH est altérée en raison d'une faible cohérence centrale qui limite l'analyse de la configuration de points en une forme globale humaine (Blake et al., 2003) (Hypothèse 1). Pour d'autres auteurs, les personnes autistes ne rencontrent des difficultés que pour reconnaître des MH qui expriment une valeur sociale, en particulier émotionnelle (Moore et al., 1997; Hubert et al., 2007; Parron et al., 2008) (Hypothèse 2).

Pour tester l'hypothèse 1, nous avons proposé une variante de l'épreuve de perception du MH. Nous avons en effet proposé des MH complexes présentés sous forme de points (présentation classique) et sous forme de « sticks ». Cette dernière présentation qui consiste à relier les points par des traits restitue une forme humaine plus explicite. Même si le mode en stick ne semble pas aider les jeunes enfants de développement typique, nous faisons l'hypothèse qu'il pourrait améliorer les performances des enfants avec autisme. Ce mode en stick pourrait les aider à percevoir une forme globale et donc, à palier à une cohérence centrale inefficace.

Pour tester l'hypothèse 2, nous avons évalué les compétences des enfants avec autisme (AUT) pour catégoriser des MH engagés ou non dans des scènes d'interactions sociales. Nous avons comparé leurs performances à celles d'enfants de développement typique appariés en âge mental (AM) et en âge chronologique (AC). Nous avons également étudié si les enfants avec autisme reconnaissaient de façon équivalente des IS faiblement et fortement émotionnelles. Si les enfants avec autisme ont des difficultés à comprendre la valeur émotionnelle exprimée par du MH, nous faisons l'hypothèse qu'ils auront aussi des difficultés à reconnaître des IS. De plus, nous nous attendons à ce qu'ils soient davantage en difficultés pour reconnaître une IS fortement émotionnelle plutôt qu'une IS faiblement émotionnelle.

II. 2. Résultats

II. 2. 1. Temps de réaction visuo-moteur

Nous avons proposé une épreuve visuo-motrice simple aux enfants AUT ainsi qu'aux enfants de développement typique appariés en AM et AC. Cette épreuve consistait à répondre le plus rapidement possible en appuyant sur une touche du clavier, suite à l'apparition d'une cible visuelle (simple croix au centre de l'écran). Nous avons ainsi pu mesurer le TR entre la perception visuelle et la réponse motrice, sans interférence avec des processus cognitifs. Cette épreuve avait pour objectif d'évaluer si cette réponse visuo-motrice différait, par ses caractéristiques de rapidité, entre les différents groupes d'enfants. Les enfants AUT répondent avec un $TR = 402 \pm 155$ ms, les enfants AM avec un $TR = 344 \pm 61$ ms et les enfants AC avec un $TR = 339 \pm 44$ ms.

Les résultats ne montrent aucune différence significative de TR au sein des trois groupes d'enfants ni d'effet « main droite » ou « main gauche ». Par conséquent, les enfants avec autisme réalisent l'épreuve aussi rapidement que les enfants non-autistes. De plus, tous les enfants sont aussi rapides avec leur main dominante qu'avec l'autre main : nous n'observons pas d'effet de latéralisation. Ce résultat permet de s'affranchir, dans les comparaisons de TR ultérieures, d'un effet dû à une différence initiale de vitesse de réponse ou de latéralité.

II. 2. 2. Epreuve de détection de mouvements humains

Nous avons proposé aux trois groupes d'enfants une épreuve de détection de MH. Les enfants avec autisme ont détecté 98 % des MH proposés. La moitié des enfants autistes mettent 872 ms (médiane), le premier quart des enfants (Q1) met 691 ms et le troisième quart (Q3) met 1052 ms pour détecter un MH. Les enfants de développement typique en ont détectés 100 %. La vitesse avec laquelle la moitié des enfants appariés en AM répond est 652 ms (Q1 : 578 – Q3 : 868) alors que cette vitesse est de 672 ms (Q1 : 603 – Q3 928) pour la moitié des enfants appariés en AC.

L'analyse statistique ne montre aucune différence significative en termes de nombre de réponses correctes et de TR : les enfants avec autisme discriminent du MH aussi rapidement et de façon aussi efficace que les enfants de développement typique (AM et AC).

Deux sessions de perception du MH étaient proposées aux enfants : « avant » et « après » l'épreuve de reconnaissance des IS. Les enfants avec autisme mettent 933 ± 299 ms avant et 838 ± 283 ms après l'épreuve de reconnaissance des IS. Les enfants AM mettent 709 ± 172 ms avant et 689 ± 134 ms après tandis que les enfants AC mettent 733 ± 180 ms avant et 700 ± 107 ms après l'épreuve de reconnaissance des IS. Aucun bénéfice n'est retiré lors d'une seconde présentation de MH pour aucun des groupes d'enfants.

II. 2. 3. Profil des réponses au cours de l'épreuve

Nous avons évalué le « profil de réponses » du groupe d'enfants AUT et des deux groupes d'enfants appariés (AM et AC). Nous avons ainsi comptabilisé le nombre d'essais pour lesquels les sujets n'avaient pas donné de réponse, avaient répondu de façon anticipée, avaient produit une réponse incorrecte et enfin avaient donné la réponse correcte. Ces profils de réponses sont présentés dans la Figure 22.

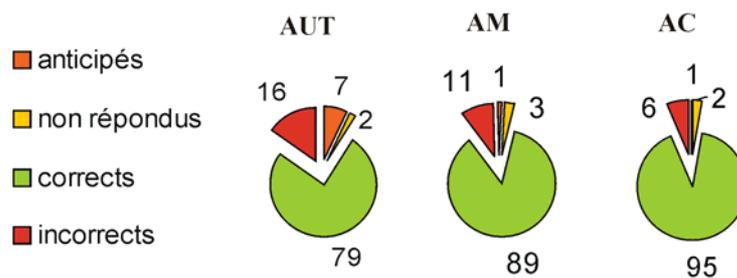


Figure 22 : Profil de réponses obtenues au cours de l'épreuve exprimé en nombre de réponses en fonction du type de réponses possibles, indépendamment de la catégorie et du mode de présentation, sur l'ensemble des 104 essais proposés.

Les profils obtenus indiquent que le nombre d'essais non répondus est négligeable (inférieur à 3 essais sur 104) pour les trois groupes d'enfants. En revanche, le groupe AUT réalise davantage d'essais anticipés (7 / 104 soit 8 %) alors que l'anticipation des réponses est quasiment nulle (1 %) dans les deux groupes d'enfants appariés. La proportion des réponses correctes sur la totalité de l'épreuve est élevée dans les trois groupes d'enfants. Les enfants avec autisme répondent correctement à 76 % des essais proposés (79 / 104) contre 86 % (89 / 104) chez les enfants appariés en AM et 91 % (95 / 104) chez les enfants appariés en AC.

Ces résultats indiquent premièrement que les enfants avec autisme se sont engagés dans l'épreuve de façon équivalente aux enfants de développement typique. Deuxièmement, ils réussissent l'épreuve bien au-delà du seuil lié au hasard. Toutefois, leurs performances sont inférieures à celles des enfants de même AM et de même AC. D'autre part, comme dans l'étude développementale précédente, nous retrouvons une performance qui augmente avec l'âge. En effet, les enfants du groupe AM âgés en moyenne de 8 ans et 7 mois sont moins performants que les enfants du groupe AC âgés de 9 ans et 11 mois.

II. 2. 4. Effet de la catégorie : IS *versus* NIS ?

Quatre sessions composées de deux catégories d'animations, des interactions sociales (IS) et des non interactions sociales (NIS), ont été proposées aux enfants de chaque groupe. Dans cette épreuve, nous avons enregistré à la fois le nombre de réponses correctes mais aussi le TR des essais correctement répondus.

II. 2. 4. 1. Performance

Sur 52 essais proposés en IS et 52 essais proposés en NIS, les enfants avec autisme répondent correctement à 38 ± 9 essais en IS et 41 ± 9 essais en NIS. Les enfants appariés en AM répondent correctement à 44 ± 4 essais en IS et 45 ± 6 essais en NIS alors que les enfants appariés en AC répondent correctement à 46 ± 4 essais en IS et 49 ± 3 essais en NIS.

Les analyses mettent en évidence un effet « groupe » ($F_{2, 22} = 8,895$ avec $\alpha = 0,001$). Les enfants avec autisme réussissent moins bien l'épreuve que les deux groupe d'enfants de développement typique ($\alpha < 0,05$) Nous n'observons pas de relation entre les deux facteurs « catégorie » et « groupe » : les enfants avec autisme sont moins efficaces qu'il s'agisse de scènes sociales ou de scènes non sociales.

II. 2. 4. 2. Temps de réaction

Les enfants avec autisme sont globalement moins performants que les enfants non-autistes, que ce soit pour reconnaître des animations sociales ou non sociales. La comparaison inter-groupe et inter-catégorie des vitesses pour catégoriser les items renseigne sur la facilité avec laquelle ils réalisent la tâche.

Les données expérimentales montrent que le TR des enfants avec autisme est de 2105 ± 515 ms pour les animations IS et 1945 ± 425 ms pour les animations NIS. Le TR des enfants AM est de 1535 ± 443 ms pour les animations SI et 1629 ± 456 ms pour les animations NIS tandis que le TR des enfants AC est de 1756 ± 324 ms pour les animations IS et 1699 ± 243 ms pour les animations NIS.

Les résultats mettent en évidence un effet « groupe » ($F_{2, 22} = 6,184$ avec $\alpha = 0,007$) qui indique que, sur l'ensemble de l'épreuve, les enfants avec autisme sont moins rapides que les enfants appariés en AM ($\alpha < 0,05$). Nous notons également une interaction « catégorie \times groupe » ($F_{2, 22} = 4,717$ avec $\alpha = 0,020$) c'est-à-dire qu'en fonction de la catégorie, les enfants autistes ne répondent pas à la même vitesse.

Pour la catégorie IS, le groupe AUT répond moins vite que les groupes AM et AC ($\alpha < 0,05$) (Figure 23-A). En revanche, aucun effet n'est observé pour la catégorie NIS : tous les enfants répondent à la même vitesse. Une comparaison inter-catégorie pour le groupe des enfants autistes indique que ces enfants répondent plus lentement pour catégoriser une scène sociale qu'une scène non sociale ($\alpha < 0,05$) (Figure 23-B).

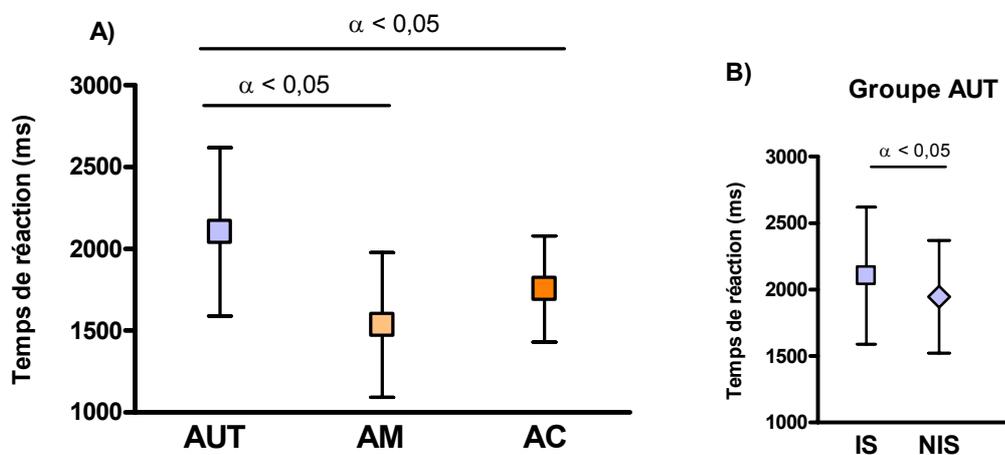


Figure 23 : Graphiques représentant l'effet groupe obtenu sur le temps de réaction pour catégoriser les interactions sociales (A) et l'effet inter-catégorie pour le groupe des enfants avec autisme (B).

II. 2. 5. Effet du mode de présentation : Point *versus* Stick ?

Les animations, qu'elles soient sociales ou non sociales, ont été présentées de deux façons différentes : en points lumineux et en sticks. Nous faisons l'hypothèse que, en liant les points en une forme explicite, le mode en stick pourrait aider les enfants avec autisme à reconnaître les scènes présentées. Ainsi, nous avons évalué si le mode de présentation avait une influence sur la performance des enfants autistes.

II. 2. 5. 1. Performance

Sur 52 animations présentées en stick et 52 présentées en point, les enfants avec autisme reconnaissent correctement à 38 ± 7 animations en stick et à 40 ± 7 animations en point. Les enfants AM reconnaissent correctement à 45 ± 4 animations en stick et à 44 ± 4 animations en point tandis que les enfants AC reconnaissent correctement à 48 ± 3 animations en stick et à 47 ± 4 animations en point.

Nous avons analysé les facteurs « groupe » et « mode de présentation ». Nous obtenons un effet significatif pour le facteur « groupe » ($F_{2, 22} = 9,308$ avec $\alpha < 0,001$) qui indique que les enfants avec autisme réussissent moins bien l'épreuve que les enfants AM et AC ($\alpha < 0,05$) (Figure 24-A). En revanche, les résultats n'indiquent aucune interaction ce qui signifie que les performances des enfants sont indépendantes du mode de présentation. Les scènes ne sont pas mieux reconnues lorsque le MH est présenté sous forme de stick chez les enfants avec autisme (ni chez les autres enfants, comme nous l'avons montré dans l'étude développementale).

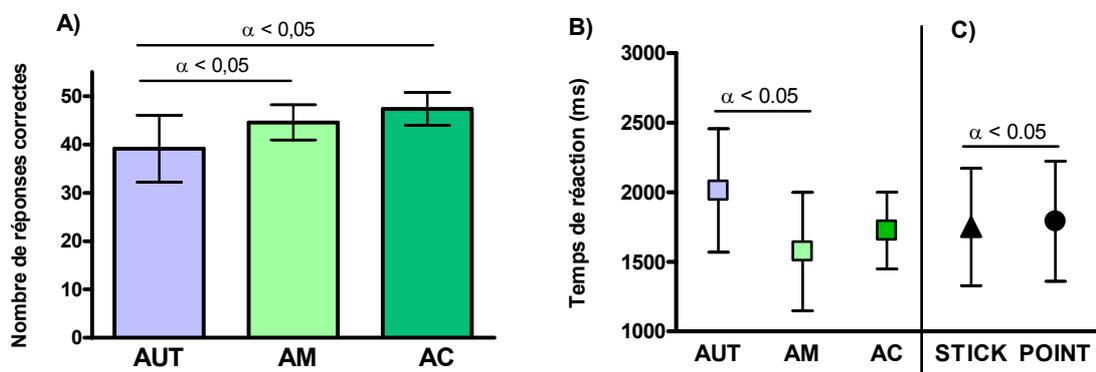


Figure 24 : Graphiques représentant l'effet groupe obtenu sur le nombre de réponses correctes (A) et sur le temps de réaction (B), indépendamment du mode de présentation. Le graphique C illustre l'effet entre le mode stick et point, indépendamment du groupe d'enfants.

II. 2. 5. 2. Temps de réaction

S'ils obtiennent des performances de bonne réponse identiques quel que soit le mode de présentation, en revanche la mesure du TR nous renseigne sur la facilité avec laquelle nos sujets ont catégorisé les stimuli.

Les données expérimentales montrent que le TR des enfants avec autisme est de 1993 ± 448 ms pour les animations en stick et 2033 ± 460 ms pour les animations en point. Le TR des enfants AM est de 1557 ± 416 ms pour les animations en stick et 1593 ± 450 ms pour les animations en point tandis que le TR des enfants AC est de 1703 ± 295 ms pour les animations en stick et 1749 ± 266 ms pour les animations en point. Les trois groupes confondus, le TR pour reconnaître une animation en stick est de 1759 ± 450 ms et une animation en point est de 1793 ± 509 ms.

Les analyses statistiques indiquent que le facteur « groupe » est significatif ($F_{2, 22} = 6,282$ avec $\alpha = 0,007$) ce qui signifie que les enfants autistes sont de façon générale plus lents que les enfants appariés en AM ($\alpha < 0,05$) (Figure 24-B).

De façon intéressante, nous obtenons également un effet de « mode de présentation » ($F_{1, 22} = 16,042$ avec $\alpha = 0,002$), en faveur d'un TR plus court lorsque les MH sont présentés sous une forme explicite en présentation stick. Ainsi, ce mode de présentation facilite la reconnaissance des animations quel que soit le groupe d'enfants ($\alpha < 0,05$) (Figure 24-C).

Nous n'observons pas d'interaction entre ces deux facteurs : les enfants de chaque groupe pris séparément répondent aussi vite lorsqu'il s'agit d'animations en point ou en stick. Il est ainsi à noter que l'effet de la présentation est général et ne concerne pas un groupe d'enfants en particulier, et que cet effet n'est pas plus prononcé chez les enfants autistes.

II. 2. 6. Lien entre niveau intellectuel et performance chez les enfants avec autisme ?

Les analyses précédentes indiquent que le groupe des enfants avec autisme réussissent moins bien l'épreuve et plus particulièrement pour reconnaître une scène sociale. Cette différence de performance est-elle relative au niveau intellectuel de ces enfants ? Pour répondre à cette question, nous avons évalué le coefficient de corrélation entre le pourcentage de réponses correctes pour chaque catégorie et le quotient intellectuel de performance (QIP).

Les résultats illustrés dans la Figure 25 montrent que le QIP et la performance pour reconnaître IS ne sont pas liés ($r = 0,0378$) ni le QIP et la performance pour reconnaître NIS ($r = - 0,407$). Par conséquent, les différences significatives que nous obtenons dans le groupe AUT ne sont pas imputables à leur niveau intellectuel.

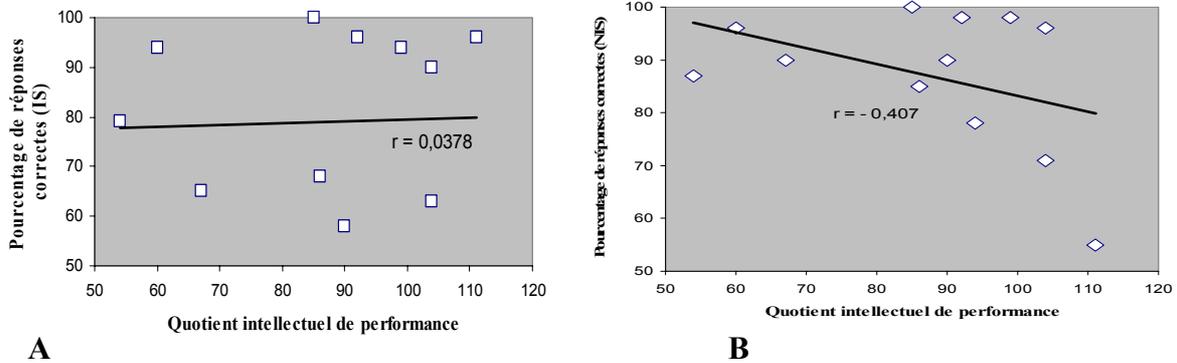


Figure 25 : Graphiques représentant les coefficients de corrélation entre le quotient intellectuel de performance et le pourcentage de réponses correctes pour reconnaître une IS (A) et une NIS (B).

II. 2. 7. Effet de l'intensité émotionnelle ?

Dans une étude préliminaire, les animations illustrant des IS ont été évaluées pour quantifier leur contenu émotionnel (se référer à la partie Matériels et Méthodes). Sur la base de cette cotation, nous avons groupé deux types d'intensité émotionnelle (forte et faible) puis analysé *a posteriori* le profil de réponses obtenues au sein des trois groupes. Dans la mesure où le nombre d'essais proposés n'était pas équivalent d'une intensité émotionnelle à l'autre (noté Max. dans la Figure 26), nous avons comparé le nombre de réponses correctes par type d'intensité pour les trois groupes d'enfants. Sur 14 IS à forte intensité émotionnelle, les enfants autistes répondent correctement à 10 ± 3 , les enfants appariés en AM à 11 ± 1 et les enfants appariés en AC à 12 ± 2 . Sur 12 IS à faible intensité émotionnelle, les enfants autistes répondent correctement à 8 ± 8 , les enfants appariés en AM à 10 ± 1 et les enfants appariés en AC à 10 ± 1 .

Concernant les performances (Figure 26), les résultats montrent un effet « groupe » pour la forte intensité émotionnelle ($F_{2, 22} = 5,098$ avec $\alpha = 0,015$) et pour la faible intensité émotionnelle ($F_{2, 22} = 8,706$ avec $\alpha = 0,002$). Quelle que soit l'intensité émotionnelle, les enfants du groupe AUT font plus d'erreurs que les enfants des groupes AM et AC ($\alpha < 0,05$).

En d'autres termes, les enfants avec autisme ont une difficulté pour reconnaître une IS qui n'est pas liée spécifiquement à la compréhension des émotions.

Ces résultats sont équivalents si l'on compare le TR avec un effet « groupe » pour la forte intensité émotionnelle ($F_{2, 22} = 5,251$ avec $\alpha = 0,014$) et pour la faible intensité émotionnelle ($F_{2, 22} = 3,314$ avec $\alpha = 0,013$).

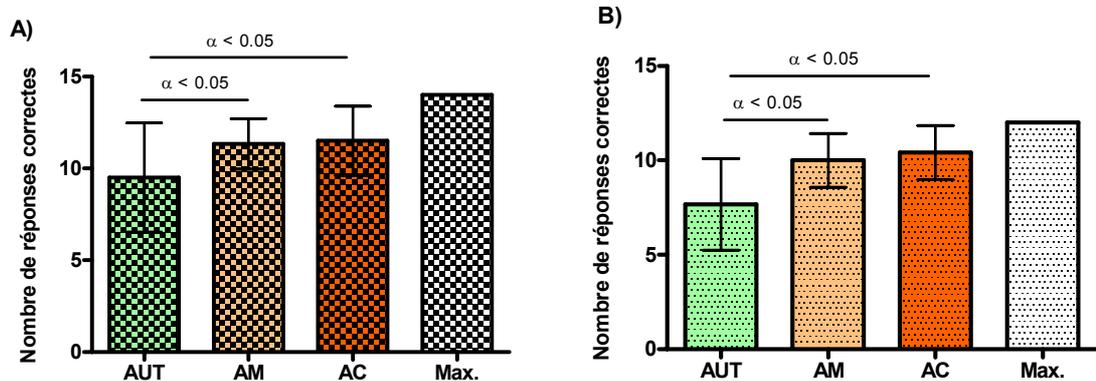


Figure 26 : Histogramme représentant le nombre de réponses correctes lors de la reconnaissance d'interactions sociales fortement émotionnelles (A) et faiblement émotionnelles (B) au sein des trois groupes d'enfants. Max. est le nombre total d'essais proposés.

II. 2. 8. Description qualitative des IS reconnues ou non reconnues

Nous avons présenté dans le Tableau 5 les IS qui sont reconnues par tous les enfants autistes (12 / 12) ou au contraire celles qui sont difficilement reconnues (moins de 7 enfants sur 12).

Nombre d'enfants	Nature des IS	Conventions sociales	Situations émotionnelles	Jeux / sports collectifs	Indices spatio-temporels forts
12/12	Agiter les mains pour se dire « au revoir »	oui			proximité
12/12	Partager sa joie (face à face)		oui		proximité
12/12	Faire de l'escrime			oui	proximité
12/12	Se serrer la main	oui			contact
12/12	Etre rattrapé lors d'une chute	oui			contact
12/12	Se faire la bise	oui			contact
12/12	Danser la valse			oui	contact
12/12	Faire la révérence	oui			proximité
[...]					
7/12	Se faire consoler		oui		contact
7/12	Partager sa joie		oui		proximité
7/12	Montrer quelque chose en haut	oui			
6/12	Proposer à quelqu'un de s'asseoir	oui			

Tableau 5 : Natures des IS que tous les enfants autistes (12 / 12) reconnaissent et celles dont moins de la moitié (entre 7 / 12 et 6 / 12) des enfants reconnaissent. Ces IS sont classées selon les trois nuances sociales : conventions sociales, situations émotionnelles et jeux / sports collectifs. Les indices visuo-spatiaux désignent la « proximité » ou rapprochement physique ainsi que le « contact » ou toucher entre les deux acteurs de la scène.

A titre d'exemple, des situations codifiées socialement comme « Agiter les mains pour se dire au revoir », « Se serrer la main » ou « Se faire la bise » sont facilement catégorisées en IS par tous les enfants autistes. Il est intéressant de souligner que ces trois exemples sont des scénarii sociaux communément abordés lors des séances d'habilités sociales. Les enfants ont une expérience sociale de ces IS. D'autre part, une situation émotionnelle telle que « Partager sa joie » peut très bien être difficilement reconnue selon la perspective choisie. Il semblerait ainsi que des indices perceptifs aient une importance dans la reconnaissance des animations sociales bien plus que l'expérience sociale que peuvent en avoir les enfants. En effet, il n'est pas évident que des scènes telles que « Faire de l'escrime », « Danser la valse » ou « Faire la révérence » soient des situations familières pour ces enfants. En revanche, le point commun qui les unit est une singularité visuo-spatiale caractérisée par le rapprochement ou le contact physique entre les deux acteurs.

Toutefois nous ne pouvons pas avancer qu'une stratégie visuelle facilite systématiquement la reconnaissance d'IS puisque des scènes émotionnelles telles que « Pleurer et se faire consoler » ou « Partager sa joie » sont caractérisées par des indices visuels forts et sont pourtant mal reconnues par 7 enfants autistes sur 12. L'animation « Montrer quelque chose en haut » illustre une situation impliquant l'attention conjointe et cette animation est particulièrement difficile à catégoriser pour les enfants. Nous pouvons émettre l'hypothèse qu'en dépit d'indices visuels prégnants, les enfants autistes reconnaissent peu ces IS notamment par manque d'expérience sociale d'autant plus que ces scènes sollicitent des ressources « sociales » importantes (empathie, attention conjointe).

😊 Récapitulatif...

Les enfants avec autisme reconnaissent le MH et ce, de façon aussi efficace et aussi rapide que les enfants de développement typique.

De façon générale, les enfants autistes ont davantage de difficultés pour catégoriser les scènes visuelles par rapport à des enfants de développement typique de même âge mental et chronologique : leurs performances sont moins bonnes et ils sont plus lents, notamment lorsqu'il s'agit d'une interaction sociale.

La présentation en mode stick n'influence pas les performances, mais améliore la rapidité de reconnaissance des scènes pour tous les enfants, autistes et non-autistes.

Les difficultés rencontrées par les enfants avec autisme ne s'expliquent ni par leur niveau intellectuel, ni par les aspects émotionnels.

II. 3. Discussion

La perception du MH : une étape réussie...

La première question reposait sur les aptitudes des enfants autistes à détecter du MH. Nos résultats montrent clairement que ces enfants sont tout à fait capables de discriminer du MH par rapport à du mouvement aléatoire. Distinguer un MH requiert d'extraire une forme globale à partir de points. Nos résultats ne permettent pas de mettre en évidence dans l'autisme un déficit du traitement global qui affecterait la reconstruction, à partir de points lumineux, d'un corps humain. Ces résultats corroborent ceux d'études précédentes (Parron et

al., 2008; Murphy et al., 2008; Vandenbroucke et al., 2008). Toutefois, le MH que nous avons proposé dans cette épreuve se compose de 20 marqueurs alors qu'il est généralement composé de 10-12 marqueurs dans la littérature. Chez des adultes non-autistes, il a été montré que la perception du MH est facilitée par l'augmentation du nombre de points composant le MH (Neri et al., 1998). D'autre part, il a été mis en évidence que des adolescents avec autisme ou avec retard mental détectent plus vite du MH s'il est présenté avec au moins dix points (Moore et al., 1997). Ces deux études nous conduisent à nous interroger sur un éventuel effet facilitateur dans notre étude dû au nombre élevé de points lumineux.

Les MH présentés dans nos scènes visuelles sont de nature complexe puisqu'ils représentent des actions réalisées par deux acteurs. De fait, les enfants avec autisme sont moins performants que les enfants de développement typique : ils font plus d'erreurs et mettent plus de temps pour répondre correctement. Si cette difficulté n'est pas dépassée lorsqu'une forme plus reconstruite du MH (mode stick) est proposée aux enfants avec autisme, en revanche, cette présentation explicite les aide à répondre plus rapidement. Ce bénéfice étant présent chez tous les enfants, autistes ou au développement typique, on peut penser que l'extraction d'un contour implicite à partir des points lumineux n'est pas aussi immédiate et automatique que ce que l'avait prédit Johansson (Johansson, 1973), tout du moins pour les groupes d'âge que nous avons étudiés. L'absence de mesures de TR chez l'adulte ne nous permet pas de conclure qu'il s'agit d'une limite maturationnelle chez l'enfant, ou bien si cet effet marque une étape de traitement supplémentaire du système visuel, présente de façon générale à tous les âges de la vie.

... mais des difficultés pour catégoriser les interactions sociales

Si les enfants autistes perçoivent le MH, alors nous pouvons faire l'hypothèse qu'ils ont accès à un support leur permettant de transformer les mouvements du corps en composantes sociales.

Les enfants avec autisme réussissent l'épreuve bien au-delà du seuil lié au hasard. Par conséquent, présenter une IS sous forme minimaliste sans autres informations perceptives que celles portées par le mouvement semble permettre à ces enfants de distinguer une scène sociale d'une scène non sociale. Cependant, leurs performances globales sont comparables à celles obtenues chez des enfants non-autistes plus jeunes, âgés entre quatre et six ans (étude

développementale). Ainsi, notre étude montre que les enfants avec autisme catégorisent globalement moins bien les animations que les enfants non-autistes. Par ailleurs, les enfants autistes sont significativement moins performants que des enfants non-autistes appariés en âge chronologique mais aussi en âge mental. Enfin, les enfants autistes mettent plus de temps pour reconnaître une IS. L'ensemble de nos résultats suggère que, même si le MH semble être un canal qu'ils se plaisent à exploiter, ils n'accèdent pas au contenu social exprimé par le mouvement du corps avec la même aisance que des enfants typiques d'âge chronologique ou d'âge mental comparables.

D'autre part, il n'y a pas de corrélation entre la performance des enfants autistes et leur score au test de quotient intellectuel non-verbal. Par conséquent, cette difficulté est indépendante des compétences intellectuelles des enfants. Ces résultats corroborent les données de la littérature. En effet, des enfants présentant un retard mental reconnaissent du MH aussi bien que des enfants de développement typique (Moore et al., 1997). D'autre part, l'exemple clinique des enfants atteints du syndrome de Williams montre qu'un niveau intellectuel relativement bas n'entrave pas de bonnes aptitudes sociales. En effet, ces enfants ont un profil clinique à l'opposé de celui des enfants atteints d'autisme dans le sens où ils s'engagent dans les interactions sociales de façon excessive (pour revue, voir Martens et al., 2008). Pourtant ils présentent un faible quotient intellectuel qui ne les met pas en difficulté dans des épreuves de compréhension sociale (Santos et Deruelle, 2009). Les enfants atteints du syndrome de Williams sont toutefois en difficulté lorsqu'il s'agit de reconnaître les expressions émotionnelles portées par le visage (Lacroix et al., 2009).

Nous nous sommes demandés si la difficulté à reconnaître une IS provenait d'une difficulté à identifier le contenu émotionnel d'un MH comme cela a été démontré chez l'adulte (Hubert et al., 2007) et l'enfant avec autisme (Parron et al., 2008; Moore et al. 1997). Or, les enfants autistes sont autant en difficulté pour reconnaître une IS qu'elle soit à fort ou à faible contenu émotionnel. Le choix du paradigme expérimental conforte ces résultats dans la mesure où nous avons limité la contribution des compétences langagières des enfants en évinçant tout protocole nécessitant un recueil de réponses verbales. Au vu des particularités de langage décrites dans cette pathologie (Pry et al., 2009), il paraît difficile d'interpréter des résultats issus de réponses descriptives. Le protocole que nous avons choisi dans cette étude évite ce biais. Ainsi, nos résultats montrent que, ce n'est pas la compréhension d'une émotion, mais bien le contenu social dans son ensemble qui fait défaut chez les enfants avec autisme.

Nous constatons par ailleurs, que les scènes sociales les mieux reconnues font référence à des scénarii sociaux que les enfants autistes connaissent. L'expérience sociale de ces IS leur a probablement permis d'élaborer des représentations de l'action. A l'inverse, nous remarquons que les IS les plus difficiles à reconnaître sont celles dont ils font peu l'expérience. En effet ces scènes font appel à des capacités d'empathie et d'attention conjointe, c'est-à-dire des aptitudes sociales peu exprimées par les personnes avec autisme.

Utilisation d'une stratégie visuo-spatiale ? L'intérêt de l'oculomotricité

Nous n'écartons pas l'hypothèse d'une stratégie visuelle utilisée par les enfants avec autisme pour réussir l'épreuve de catégorisation. En effet, nous retenons de l'analyse descriptive que les scènes sociales les mieux reconnues, outre l'expérience sociale, sont celles à forts indices visuo-spatiaux. De plus, si l'on considère les performances des enfants pour reconnaître des scènes non sociales, le mode en stick les aide : ils se servent par conséquent des informations visuelles. D'autre part, les commentaires des enfants autistes évoquent une stratégie spatiale lorsqu'ils décrivent les animations sociales comme « les points qui se mélangent ». Aussi nous nous interrogeons sur la stratégie visuelle qu'ils ont adoptée pour répondre à la question.

Des enregistrements d'oculométrie chez des enfants autistes et chez des enfants au développement typique permettraient d'apporter des éléments de réponse. En effet, ils permettraient d'une part de comparer les trajectoires oculaires et renseigneraient sur un intérêt porté au rapprochement des points. D'autre part, ils indiqueraient les zones d'intérêt choisies par les deux populations. Chez l'enfant au développement typique, l'hypothèse serait que la recherche d'un message social s'effectuerait en fixant son attention visuelle sur des parties du corps pertinentes, telles que le haut du corps de façon générale, les mains en particulier. En revanche dans une population d'enfants avec autisme, nous nous attendons à ce qu'ils ciblent des régions du corps non porteuses d'information sociale comme ils le font pour un visage en évitant les yeux (Klin et Jones, 2008) ou pour une scène sociale durant laquelle ils regardent les objets plutôt que les personnes (Klin et al., 2002). Enfin, un avantage supplémentaire serait que ces enregistrements offrirait également la possibilité de tester des enfants avec autisme présentant des déficits sévères et une absence marquée de communication, puisque cette épreuve ne nécessiterait aucune compréhension de consigne élaborée.

Nous retiendrons qu'en dépit d'indices visuo-spatiaux forts, les IS les plus difficilement reconnues sont avant tout celles que les enfants n'ont pas l'habitude de vivre au quotidien. Par conséquent, nous privilégions l'hypothèse d'un déficit de l'expérience sociale qui freinerait la compréhension d'une interaction sociale. En revanche, la reconnaissance des IS peut reposer sur une stratégie visuo-spatiale plutôt qu'un accès au sens social. Une étude en oculométrie permettait dans un premier temps d'évaluer et de comparer le tracé oculaire lors d'observation des IS. Nous faisons l'hypothèse que les enfants autistes n'analyseront pas la scène sociale de la même façon que les enfants non autistes. Toutefois, quelle que soit la stratégie utilisée, les enfants autistes réussissent plutôt correctement l'épreuve.

En conclusion, les enfants avec autisme sont capables d'extraire une forme globale à partir de points et perçoivent donc du MH. En revanche, ils sont davantage en difficulté si le MH est complexe et véhicule de surcroît, une information sociale. Bien qu'ils soient moins performants que les enfants non-autistes, les enfants autistes, quel que soit leur niveau intellectuel, semblent être aidés par la présentation minimaliste pour reconnaître une interaction sociale. Nous faisons l'hypothèse que cette reconnaissance est d'autant plus efficace si les enfants autistes ont élaboré des représentations de l'action grâce à une expérience sociale.

III. IDENTIFICATION DES RESEAUX SOUS-TENDANT LA RECONNAISSANCE DES INTERACTIONS SOCIALES

III. 1. Question posée

Cette étude a pour objectif d'identifier chez l'adulte les régions cérébrales impliquées dans la reconnaissance d'une interaction sociale (IS) exprimée par la cinématique du corps en action.

La contribution de la simulation motrice dans la compréhension des IS reste un sujet spéculatif dans le sens où le débat est majoritairement théorique (Jacob et Jeannerod, 2005; Brass et al., 2007). Jusqu'à présent, peu de données expérimentales ont pu nourrir le débat. Notre hypothèse est, qu'au-delà de l'implication du réseau de la mentalisation, le réseau du couplage de la perception et de l'action sera recruté lors de l'observation de scènes sociales. L'activation d'un tel réseau cérébral soulignerait le rôle de la simulation motrice dans la compréhension d'IS véhiculées par le corps en mouvement.

Au moyen de l'IRMf, nous avons exploré comment des IS mises en lumière par du MH seraient « décodées » par les circuits centraux. Nous avons proposé deux conditions expérimentales : la condition « interaction sociale » (IS) dans laquelle deux acteurs sont engagés dans une IS et la condition « non interaction sociale » (NIS) dans laquelle deux acteurs réalisent indépendamment l'un de l'autre des mouvements non dirigés vers un but et sans intention de communiquer. Notre argumentation s'appuie sur les cartes d'activations cérébrales obtenues à partir du contraste d'intérêt IS *versus* NIS.

III. 2. Résultats

III. 2. 1. Performances comportementales

Sur 56 essais proposés en IS et 56 essais proposés en NIS, les 14 sujets ont répondu correctement à 54 ± 2 essais de la catégorie IS et 55 ± 1 essais de la catégorie NIS. Les analyses statistiques mettent en évidence un effet tout juste significatif ($\alpha = 0,042$) de la catégorie. Etant donné que la différence de performance, même si elle est significative, est

très faible, il est difficile d'en conclure que les sujets reconnaissent mieux une scène non sociale qu'une scène sociale.

III. 2. 2. Contraste IS > NIS

Dans le contraste d'intérêt, les activations cérébrales significatives sont présentées dans le Tableau 6 et illustrées dans la Figure 27.

	Régions cérébrales	Coordonnées			Aire de Brodmann	Valeur de <i>t</i>	Taille du cluster
		MNI					
		x	y	z			
G	Cortex préfrontal médian (dorsal)	-3	54	27	BA9/10	8.91	73
D	Gyrus orbitofrontal latéral	24	15	-18	BA11/47	7.29	27
G	Gyrus orbitofrontal latéral	-39	24	-15	BA11/47	4.96	40
G	Gyrus frontal inférieur (<i>pars triangularis</i>)	-51	30	12	BA45/46	7.14	189
G	Gyrus frontal inférieur (<i>pars opercularis</i>)	-45	3	18	BA44/45	5.57	
D	Gyrus frontal inférieur (<i>pars triangularis</i>)	54	27	9	BA45/46	6.74	67
D	Aire motrice supplémentaire (médiane)	3	12	54	BA6	5.71	59
G	Aire motrice supplémentaire (médiane)	-9	21	57	BA6	4.17	
G	Cortex prémoteur (dorsal)	-30	0	57	BA6	5.42	14
G	Cortex prémoteur (ventral)	-45	-3	54	BA6	4.62	15
D	Cortex prémoteur (ventral)	45	12	42	BA6	4.67	13
D	Gyrus pariétal supérieur	24	-60	63	BA7	6.43	88
D	Sillon intrapariétal	24	-51	57	BA7/40	4.72	
G	Sillon intrapariétal	-42	-48	54	BA7/40	6.43	30
D	Sillon temporal supérieur (postérieur)	42	-72	18	BA39	5.42	42
G	Jonction temporo-pariétale	-51	-51	21	BA39	5.81	134
G	Sillon temporal supérieur (postérieur)	-48	-63	12	BA21/22	5.12	
D	Sillon temporal supérieur (antérieur)	51	-3	-21	BA21/22	5.52	35
D	Gyrus temporal inférieur	57	-36	-18	BA21	5.24	18
D	Gyrus fusiforme (FBA)	45	-42	-21	BA21	4.42	
D	Gyrus temporal médian (EBA)	54	-54	0	BA19/37	4.27	18
D	Noyau caudé	9	18	0		7.31	54
G	Noyau caudé	-9	9	6		5.99	151
G	Noyau thalamique (ventral antérieur)	-3	-9	0		5.81	

Tableau 6 : Activations cérébrales obtenues après analyse en effet aléatoire de groupe sur l'ensemble du cerveau dans la condition IS versus NIS. La valeur de *t* reflète la différence statistique entre les deux conditions. Les activations sont celles obtenues après correction pour comparaison multiple (FDR) pour un risque d'erreur inférieur à 0,05. Seules les activations de 10 voxels ont été retenues. FBA= fusiform body area, EBA= extrastriate body area. G/D: hémisphères gauche ou droit.

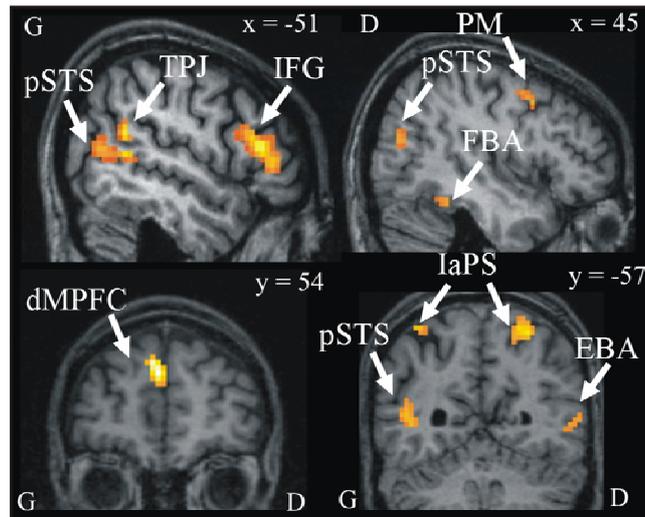


Figure 27 : Activations significatives ($p < 0,05$ corrigé) analysées en effet aléatoire (RFX) lors de l'observation d'animations avec interactions sociales (IS) versus sans interaction sociale (NIS). Les activations de groupes sont représentées sur une image anatomique normalisée d'un des cerveaux des sujets adultes. D/G = hémisphères droit et gauche ; pSTS = sillon temporal supérieur postérieur ; TPJ = jonction temporo-pariétale ; FBA = *fusiform body area* ; EBA = *extrastriate body area* ; dMPFC = cortex préfrontal médian dorsal ; IFG = gyrus frontal inférieur ; PM = cortex pré-moteur ; IaPS = sillon intrapariétal.

Des activations temporales ont été identifiées bilatéralement dans la partie postérieure du sillon temporal supérieur (pSTS) et dans l'hémisphère droit pour le sillon temporal antérieur (aSTS). Nous avons également observé des activations dans la jonction temporo-pariétale droite (TPJ). Par ailleurs, nous avons repéré des activations dans le gyrus temporal inférieur droit et dans le gyrus temporal médian droit qui correspondent respectivement à la région nommée FBA (de l'anglais, *fusiform body area*) et la région notée EBA (de l'anglais, *extrastriate body area*).

Des activations frontales incluant la région dorsale du cortex préfrontal médian (dMPFC) de l'hémisphère gauche et bilatéralement les cortex orbito-frontaux (OFC) ont été identifiées. Nous avons mis en évidence une activation bilatérale des régions fronto-pariétales à savoir les gyri frontaux inférieurs (IFG), plus précisément les régions *pars triangularis* et *pars opercularis*, les aires prémotrices (PM) ainsi que le gyrus pariétal supérieur droit (SPG) et les sillons intrapariétaux (IaPS) bilatéraux. Nous notons également l'activation bilatérale des aires motrices supplémentaires (SMA). De façon moins escomptée, nous avons trouvé une forte activation bilatérale des noyaux caudés des ganglions de la base.

III. 3. Discussion

L'originalité de ce protocole repose sur l'utilisation d'animations en points lumineux qui permet d'isoler la composante sociale de scènes visuelles caractérisées par du mouvement humain (MH).

En dépit d'une présentation minimaliste, les sujets sont capables d'interpréter les actions dans lesquelles sont engagés les deux acteurs comme étant des scènes sociales et des scènes non sociales. Il a été montré que des MH non sociaux tels que marcher ou courir sont mieux reconnus que des MH intentionnels tels que se saluer ou danser (Dittrich, 1993). Dans notre étude, les sujets catégorisent de façon quasiment équivalente les deux catégories de MH. Par conséquent, les différences d'activations cérébrales entre les deux conditions ne peuvent s'expliquer par une différence dans la difficulté de reconnaissance des IS.

Observer deux acteurs engagés dans une IS, comparé à deux acteurs en mouvements sans valeur sociale, sollicite l'activation de régions cérébrales classiquement impliquées dans la perception du MH mais aussi dans les processus de mentalisation. Le résultat majeur de ce travail est, qu'au-delà de ces régions, l'observation d'une IS implique l'activation de régions cérébrales appartenant au couplage de la perception et de l'action, autrement dit le mécanisme miroir.

Contribution des processus attentionnels

Dans notre étude, nous ne pouvons écarter la possibilité que l'activité cérébrale mesurée dans nos conditions expérimentales soit due à des processus descendants (*top-down*) tels que des processus attentionnels. En effet, observer du mouvement complexe requiert une charge attentionnelle non négligeable (Giese et Poggio, 2003) notamment lorsqu'il s'agit de MH masqués et ambigus (Thornton et al., 2002).

Dans l'hypothèse où des processus attentionnels sont impliqués dans notre étude, alors les corrélats neurophysiologiques qui y participent devraient être sollicités. L'attention spatiale sollicitée dans des tâches de recherche de cible et de détection visuelle est soutenue par un circuit incluant le cortex frontal et pariétal (voir pour revue, Corbetta et Shulman, 2002). Récemment il a été montré que l'attention spatiale portée sur des modalités visuelles et auditives active un réseau cérébral largement distribué incluant le précuneus, les

cortex pariétaux supérieur et inférieur, la TPJ ainsi que le cortex prémoteur, la SMA et le cortex préfrontal dorsolatéral (Krumbholz et al., 2009).

D'autre part, les régions sollicitées dans l'attention s'activent en « antiphase temporelle » avec des régions cérébrales appartenant au réseau du « *default state* » (Fox et al., 2005). Ce réseau se compose du cortex préfrontal médian, du précuneus / cortex cingulaire postérieur et du cortex pariétal inférieur (Gusnard et Raichle, 2001). Ce réseau a été mis en évidence en l'absence de demande attentionnelle en comparaison avec une situation d'engagement dans une tâche expérimentale (Raichle et al., 2001; Gusnard et Raichle, 2001). Il a été proposé que ce réseau du « *default state* » ferait référence à soi et relèverait de pensées introspectives (de l'anglais, *inner speech*) (pour revue, voir Broyd et al., 2009). Ainsi, ce réseau de l'attention et du « *default state* » constitueraient un mécanisme interdépendant qui modulerait l'attention dirigée vers soi ou vers l'extérieur (Fransson, 2006).

Toutefois nous notons que ce mécanisme implique un réseau cérébral largement distribué qui se superpose notamment avec des régions sollicitées dans la cognition sociale (Schilbach et al., 2008). Une étude a notamment mis en évidence l'activité de certaines régions du « *default state* » lors d'observation d'IS en vidéos suggérant que peu de ressources attentionnelles sont nécessaires à l'âge adulte pour comprendre une scène sociale (Iacoboni et al., 2004) . Dans la mesure où nous avons adopté des temps d'exposition brefs et élaboré un protocole événementiel, il nous semble que nous avons minimisé l'implication des processus attentionnels dans notre étude.

Des régions impliquées dans le traitement de la forme du corps et le mouvement humain

Observer du MH dans un contexte social comparé à du MH neutre sollicite des régions cérébrales impliquées dans le traitement des caractéristiques de forme et de mouvement du corps humain. Dans la mesure où ces caractéristiques sont présentes dans les deux conditions expérimentales, nos résultats soulignent que l'analyse du MH est modulée par l'information sociale.

Le STS postérieur : du MH à la détection de l'agentivité jusqu'à l'attribution d'intention

La perception visuelle du MH est sous-tendue par l'activité du STS postérieur (Bonda et al., 1996; Grossman et al., 2000; Puce et Perrett, 2003). Cette région est également sollicitée dans la perception auditive du MH ce qui lui confère un rôle dans l'intégration

multi-sensorielle du MH (Bidet-Caulet et al., 2005). Par conséquent, le rôle du STS s'étend à d'autres processus cognitifs notamment dans la détection d'agentivité et d'interactivité. Dans notre étude, c'est précisément dans ces processus que le STS joue un rôle lors de l'observation d'IS.

L'activité du STS est sollicitée lorsque les sujets interprètent une forme abstraite en mouvement comme une entité animée (Wheatley et al., 2007). D'autre part cette région est impliquée dans la détection automatique d'entités animées suscitée par deux objets en interaction (Schultz et al., 2005). L'agentivité, encore appelée contingence intentionnelle entre deux agents (Blakemore et al., 2003), naît de la conjonction entre la capacité à détecter des entités animées et l'interactivité (objets interagissant). Le STS postérieur serait donc impliqué dans la détection de l'agentivité qui définit le rôle d'agents animés en interaction : son rôle paraît ainsi essentiel dans la compréhension d'une IS. Par ailleurs, lorsque des sujets observent deux formes géométriques en interaction, ils attribuent une intention à ces formes ce qui conduit à l'activation du STS postérieur, en plus du réseau de la mentalisation (Castelli, et al., 2000). Notre étude souligne qu'au-delà de son implication dans la détection du MH, l'activité du STS postérieur dans la condition sociale pourrait jouer un rôle dans la détection de l'agentivité et l'attribution d'intentions, compétences indispensables pour comprendre une IS.

Le cortex occipito-temporal : forme du corps et signification de l'action

Dans la condition sociale, nous avons identifié deux aires visuelles situées dans le cortex occipito-temporal nommées l'aire extrastriée du corps ou EBA (de l'anglais, *extrastriate body area*) dans le gyrus temporal médian / sillon temporal inférieur et l'aire fusiforme du corps ou FBA (de l'anglais, *fusiform body area*) dans le gyrus fusiforme postérieur.

Des études ont montré que l'EBA et le FBA jouent un rôle spécifique dans l'analyse visuelle des images relatives au corps par rapport à des images ne présentant pas de corps (Downing et al., 2001; Peelen et Downing, 2005). L'EBA ainsi que le FBA font partie des régions dévolues au traitement de la forme et sont activées lors de la perception de MH (Peelen et al., 2006 ; Michels et al., 2005). Dans le contraste IS *versus* NIS, nous observons une activation de ces deux régions alors que l'information relative à la forme et au mouvement du corps est présente dans les deux conditions. Nous nous attendions à ce que cet effet soit annulé. Or l'observation de corps en mouvement exprimant une émotion active

également l'EBA et le FBA (Peelen et al., 2007). De façon analogue, le contenu social du MH dans la condition IS sollicite ces deux régions visuelles.

La FBA permet d'intégrer l'information visuelle de chacune des parties du corps en une représentation globale (Taylor et al., 2007). L'activité du FBA dans les scènes sociales pourrait indiquer une analyse visuelle globale de la forme du corps illustré en points afin d'en extraire la valeur sociale. Quant à l'EBA, elle semble impliquée dans la reconnaissance d'une action bien que cette hypothèse soit controversée. Pour certains auteurs, l'EBA est une région exclusivement sollicitée dans l'analyse visuelle du corps même s'il s'agit de corps engagés dans une action (Downing et al., 2006; Peelen et Downing, 2005). Pour d'autres auteurs, l'EBA serait plutôt sollicitée dans la reconnaissance d'une action que dans celle de l'agent réalisant cette action (Kable et Chatterjee, 2006). Elle serait tout autant activée par la perception d'une action dirigée vers un but que par la perception de parties corporelles (Astafiev et al., 2004). Ces données expérimentales soulignent la contribution de l'EBA dans la représentation d'une action, ce qui lui confère un rôle dans le réseau du couplage de la perception et de l'action (Astafiev et al., 2004).

L'activation de l'EBA dans la condition sociale apporte un argument supplémentaire en faveur de l'implication de cette région dans la compréhension d'une action *a fortiori* sociale. Dans l'étude conduite par Kable et Chatterjee, l'activité de l'EBA est observée pour des actions de natures variées telles que des actions symboliques, instrumentales, transitives et intransitives (Kable et Chatterjee, 2006). Dans notre étude nous avons distingué les actions sociales des actions non sociales. Par conséquent, nous pouvons avancer l'idée que l'EBA joue un rôle dans la reconnaissance d'une action, modulé par la signification de cette action, en particulier dans un contexte social.

Le réseau de la mentalisation : attribution du « sens social »

Le modèle de Johansson offre la possibilité d'étudier le MH et tout ce qu'il exprime par le mouvement du corps, c'est-à-dire sans autres informations telles que le regard ou les émotions faciales. Lorsqu'on ne retient du MH que le contenu social, nous mettons en évidence de fortes activations dans la jonction temporo-pariétale (TPJ) gauche, le cortex préfrontal médian dorsal (MPFC) et le cortex orbito-frontal (OFC). Jusqu'alors, aucun protocole en neuro-imagerie n'a eu recours au modèle en points lumineux pour explorer les

processus de mentalisation. Notre étude montre que l'observation de MH dans un contexte social sollicite le réseau cérébral dévolu à l'attribution d'intentions et d'états mentaux.

La jonction temporo-pariétale : Porte d'entrée de l'intention communicative

La TPJ est une région recrutée dans de nombreuses fonctions cognitives (pour revue, voir Lamm et al., 2007). Cette région est impliquée dans des épreuves qui nécessitent une prise de perspective égocentrée ou à la place d'autrui (Ruby et Decety, 2003) mais aussi dans la perception de son propre corps hors de soi (expérience d'illusions du corps hors de soi, de l'anglais, *out-of-body*) (Blanke et al., 2005). Cette région permettrait ainsi de maintenir une représentation cohérente de son propre corps (Tsakiris et al., 2008). C'est assurément la contribution de la TPJ dans la prise de perspective qui a fait de cette région le cœur du réseau de la mentalisation. L'attribution des états mentaux serait sous-tendue par la TJP (pour revue, voir Saxe, 2006; Saxe et Wexler, 2005).

Alors que certains auteurs soulignent le rôle de la TPJ de l'hémisphère droit dans la mentalisation (Saxe et Wexler, 2005), nous avons mis en évidence la TPJ de l'hémisphère gauche dans la condition sociale. Une récente étude a montré que cette région était recrutée différemment selon les hémisphères (Ciaramidaro et al., 2007). Dans leur protocole expérimental, ces auteurs ont distingué les intentions privées (dirigées vers un but privé) des intentions communicatives (dirigées vers un but social adressé à un tiers) contenues dans des images. Les auteurs ont mis en évidence une activité de la TPJ dans l'hémisphère gauche pour la condition d'intentions communicatives qui s'apparente à notre condition sociale (deux acteurs engagés dans une scène sociale). Contrairement à la TPJ de l'hémisphère droit impliquée dans l'intention privée, la TPJ de l'hémisphère gauche serait sollicitée spécifiquement dans la compréhension de scènes d'IS (Ciaramidaro et al., 2007). D'autre part, une lésion de la TPJ gauche se traduit chez les patients par un déficit dans le raisonnement sur les croyances d'autrui (Samson et al., 2004; Carmichael, 2004).

Par ailleurs, le rôle spécifique de la TPJ droite est remis en cause puisque cette région est également sollicitée dans des épreuves de réorientation attentionnelle (pour revue, voir Lamm et al., 2007; Mitchell, 2008). En revanche, le rôle de la TPJ de l'hémisphère gauche n'est pas au cœur des controverses.

Le cortex préfrontal médian dans les relations interindividuelles

Le MPFC est activé dans des épreuves qui nécessitent de « penser » à soi ou à autrui. L'activation de cette région est d'autant plus importante que le jugement porte sur un individu

différent de soi (pour revue, voir Frith, 2007). Par ailleurs, deux récentes études ont montré l'implication du MPFC dans la compréhension d'IS au moyen d'images illustrant des intentions communicatives (Walter et al., 2004; Ciaramidaro et al., 2007). Une autre étude a également souligné le rôle du MPFC dans sa partie dorsale dans l'observation de relations sociales présentées en vidéos (Iacoboni et al., 2004).

Nos résultats vont dans le même sens que ces travaux dans la mesure où nous avons mis en exergue une activation bilatérale du MPFC dorsal confirmant son implication dans la compréhension de deux acteurs engagés dans une IS. Par conséquent, indépendamment du mode de présentation, le MPFC dorsal tient un rôle dans la compréhension de scènes sociales ce qui lui confère un rôle privilégié dans le réseau de la mentalisation.

Le cortex orbitofrontal : attribution d'un jugement social

L'OFC a été associé à la notion de but à atteindre (Plassmann et al., 2007) et de récompense / punition (Kringelbach et Rolls, 2004). D'autre part, l'OFC jouerait un rôle dans le renforcement social (Rolls, 2000) et dans les comportements moraux (Decety et al., 2008). Bien que nous n'ayons pas d'hypothèse *a priori* sur cette région, nous pouvons interpréter cette activité comme étant associée au « jugement social » du contenu des IS. Par ailleurs l'activation du noyau caudé, tout aussi inattendue, est probablement concomitante à celle de l'OFC de par leurs connexions anatomiques (Alexander et Crutcher, 1990).

Le réseau du couplage de la perception et de l'action : compréhension d'une interaction sociale par le corps en mouvement

En isolant le contenu social de scènes visuelles portées par du MH, nous avons mis en exergue l'activation du réseau fronto-pariétal composé du sillon intrapariétal, des aires prémotrices et du cortex frontal inférieur. Ce circuit est l'analogue chez l'homme du système des neurones miroirs initialement décrit chez le singe (pour revue, voir Rizzolatti et Craighero, 2004). Comme nous l'avons décrit dans le cadre théorique, le système miroir est le support neurophysiologique de la théorie de la simulation motrice. Selon cette théorie, les représentations de l'action joueraient un rôle dans la perception et la compréhension des comportements d'autrui (Rizzolatti et al., 2001; Jeannerod, 2001; Decety et Grezes, 2006). En ciblant les informations portées par le mouvement du corps, nous avons démontré pour la première fois que la simulation motrice participe à la compréhension d'une IS.

Observer des actions qui appartiennent à notre répertoire moteur sollicite l'activation du cortex prémoteur et du sillon intrapariétal. En effet, l'expertise motrice, comme celle d'un danseur de ballet ou de capoeira, est associée à l'activation du réseau fronto-pariétal bien plus que chez des individus non-danseurs (Calvo-Merino et al., 2005). La familiarité visuelle pour des mouvements de danse pourrait expliquer le recrutement de ce réseau plus important chez les danseurs. Cette hypothèse a été testée chez des danseurs de sexe opposé qui sont experts de certains mouvements différents entre danseurs et danseuses et qui ont l'habitude de s'entraîner ensemble. Ainsi, les danseurs / danseuses développent une familiarité visuelle pour les mouvements réalisés par des partenaires de sexe opposé. Une étude a montré que le circuit miroir est d'autant plus activé que les mouvements appartiennent au répertoire moteur des sujets, en dépit d'une expérience visuelle pour les autres mouvements (Calvo-Merino et al., 2006). Par ailleurs, l'activité de ce réseau est augmentée si les sujets apprennent à réaliser de nouveaux mouvements (Cross et al., 2006). En effet, l'activité du cortex prémoteur est supérieure chez des danseurs entraînés lorsqu'ils observent ou simulent les mouvements qu'ils ont appris pendant seulement cinq semaines (Cross et al., 2006). D'autre part, cette étude souligne le rôle de la SMA dans sa partie rostrale dans le système miroir. Nous avons également mis en évidence cette région ce qui renforce l'idée que la SMA contribue à la simulation motrice. En outre, l'effet de l'entraînement sur le recrutement du réseau fronto-pariétal souligne la formidable plasticité de ce système qui a d'ailleurs été mise à profit chez des patients souffrant de déficits moteurs (Ertelt et al., 2007; Buccino et al., 2008).

Comme nous l'avons exposé dans la partie théorique, la théorie de la simulation motrice jouerait un rôle dans la compréhension des intentions d'autrui (Gallese et Goldman, 1998; Blakemore et Decety, 2001; Thioux et al., 2008). L'intention qui amène à agir peut être suggérée par un contexte explicite et être ainsi comprise par un observateur extérieur. Ainsi l'activité du cortex frontal inférieur droit est supérieure lorsque les sujets observent une scène suggérant une intention (saisie d'une tasse sur un table de pique-nique) plutôt qu'une même scène sans contexte (simple saisie de tasse) (Iacoboni et al., 2005). Observer des actions dont l'intention est incongrue par rapport à des intentions cohérentes est associé à l'activation supérieure du cortex frontal inférieur (de Lange et al., 2008). Ainsi le mécanisme miroir qui sous-tend la simulation motrice permet non seulement de comprendre le but d'un acte moteur mais aussi de comprendre les actions intentionnelles réalisées par autrui.

Comprendre une IS en tant qu'observateur extérieur, c'est comprendre grâce à des indices précis l'intention d'un des deux individus et la réaction du second. En absence de

langage verbal ou d'expressions faciales, ces indices sont transmis par le mouvement du corps, support de la communication non-verbale. Le sillon intrapariétal ainsi que le cortex frontal inférieur sont des régions sollicitées dans la communication non-verbale. Outre son rôle dans le « codage » du but de l'action (Hamilton et Grafton, 2006; Tunik et al., 2007), le sillon intrapariétal est également associé au traitement des membres supérieurs en mouvement dans une action dirigée vers un but (Piefke et al., 2007). Par conséquent, l'activation de cette région particulière peut refléter une analyse précise de la gestuelle des membres supérieurs dans le but d'en saisir de forts indices sociaux. L'observation de gestes symboliques suscite l'activation du cortex frontal inférieur de façon plus importante que lors d'observation de gestes dirigés vers un but sans valeur sociale (Villarreal et al., 2008).

En conclusion, cette étude a permis pour la première fois de mettre en lumière le recrutement concomitant du réseau de la mentalisation (incluant la jonction temporo-pariétale, le cortex préfrontal médian et le cortex orbitofrontal) mais surtout le réseau du couplage de la perception et de l'action (comprenant le sillon intrapariétal, l'aire motrice supplémentaire, le cortex prémoteur et le gyrus frontal inférieur).

IV. MATURATION DES RESEAUX SOUS-TENDANT LA RECONNAISSANCE DES INTERACTIONS SOCIALES

IV. 1. Questions posées

Cette étude explore l'état de maturation des circuits cérébraux sous-tendant la reconnaissance d'interactions sociales (IS) portées par le mouvement du corps chez l'enfant de développement typique dans une tranche développementale allant de huit à 11 ans.

Chez l'adulte, l'étude précédente a permis de mettre en évidence la participation du réseau des neurones miroirs dans l'identification d'une interaction sociale. L'enfant, au fil de son expérience motrice et sociale, ne cesse de construire et d'affiner des représentations de l'action, qui lui permettent de comprendre une action intentionnelle dont il est acteur ou observateur. S'il est évident qu'un mécanisme miroir préside à la compréhension de l'action, peu d'études ont jusqu'à présent mis en évidence une réponse cérébrale associée à ce mécanisme miroir chez l'enfant. En ne présentant aux enfants que l'information portée par le mouvement, notre objectif est de mettre en lumière le recrutement de ce système fondateur.

Lorsqu'un enfant est observateur d'une IS, nous faisons l'hypothèse que les représentations de l'action sont sollicitées pour saisir le contenu social de la scène à partir de la gestuelle. Aux âges auxquels nous avons enregistré les enfants, nous nous attendons à des mécanismes centraux proches de ceux identifiés chez l'adulte. En effet, si l'étude comportementale a mis en évidence chez l'enfant âgé de sept ans des performances proches, mais pas encore équivalentes, à celles obtenues à l'âge adulte, aux âges testés dans cette étude (entre 8,6 et 11 ans), les enfants ont des performances comparables à celles des adultes. Toutefois, dans cette période du développement, les représentations de l'action sont encore en pleine expansion ce qui permet d'envisager une différence d'activité cérébrale ou une distribution différente des patrons d'activations chez l'enfant comparé à l'adulte.

IV. 2. Résultats

IV. 2. 1. Performances comportementales

Sur 84 essais proposés toutes catégories confondues, les enfants ont répondu correctement à 78 ± 3 essais et les adultes à 83 ± 2 essais. Les analyses statistiques mettent en évidence un effet significatif entre les deux groupes ($\alpha < 0,001$). Cette différence dans les performances peut paraître surprenante dans la mesure où elle n'apparaissait pas dans l'étude comportementale.

Sur 42 essais proposés en IS et 42 essais proposés en NIS, les enfants ont répondu correctement à 39 ± 3 essais de la catégorie IS et 40 ± 2 essais de la catégorie NIS. Les analyses statistiques ne mettent pas en évidence un effet significatif : tout comme les adultes, les enfants reconnaissent aussi bien une scène non sociale qu'une scène sociale.

IV. 2. 2. Contraste IS > NIS chez l'enfant

Les régions présentant une variation d'activité plus importante dans le contraste IS que dans le contraste NIS sont listées dans le Tableau 7 et Figure 28.

De façon équivalente aux activations obtenues chez l'adulte, nous observons un recrutement du circuit fronto-pariétal notamment dans le gyrus frontal inférieur de l'hémisphère gauche (*pars opercularis*) et de l'hémisphère droit (*pars triangularis*) ainsi que dans le gyrus orbitofrontal latéral de l'hémisphère gauche et dans le sillon intrapariétal de l'hémisphère droit. Nous avons également identifié une activation au niveau du cortex préfrontal dorso-médian de l'hémisphère droit. Des activations temporales ont été identifiées bilatéralement dans le sillon temporal supérieur dans la partie postérieure (pSTS), dans la partie antérieure (aSTS) ainsi que dans le gyrus temporal inférieur de l'hémisphère droit. Nous notons également des activations dans le gyrus fusiforme de l'hémisphère gauche.

De façon spécifique à l'enfant, nous trouvons des activations dans les régions occipitales comme dans le gyrus occipital inférieur de l'hémisphère gauche et des activations bilatérales dans le précuneus à proximité du gyrus angulaire.

Enfant : [IS > NIS]

	Régions cérébrales	Coordonnées MNI			Aire de Brodmann	Valeur de <i>t</i>	Taille du cluster
		x	y	z			
G	Gyrus occipital inférieur	-42	-75	-9	BA19	8.85	674
G	Sillon temporal supérieur (postérieur)	-60	-57	18	BA22/39	6.74	
G	Gyrus frontal inférieur (<i>pars opercularis</i>)	-51	9	30	BA44/45	7.77	490
G	Gyrus orbitofrontal latéral	-33	18	-12	BA11/47	5.29	
D	Gyrus angulaire / précuneus	27	-78	48	BA7	7.43	798
D	Sillon temporal supérieur (postérieur)	60	-66	3	BA22/39	7.39	
D	Gyrus temporal inférieur	48	-57	-12	BA19/37	7.15	
D	Sillon temporal supérieur (antérieur)	57	-6	-8	BA21/38	6.76	135
D	Gyrus frontal inférieur (<i>pars triangularis</i>)	51	18	18	BA45/46	5.98	381
G	Gyrus fusiforme (FBA)	-33	-48	-12	BA37	6.51 ¹	67
D	Cortex préfrontal médian (dorsal)	6	57	27	BA9	4.10 ¹	13
D	Sillon intra-pariétal	27	-63	63		4.12 ¹	10
G	Précuneus	-21	-72	39	BA7	4.30 ²	27

Tableau 7 : Activations cérébrales obtenues après l'analyse en effet aléatoire de groupe dans la condition IS versus NIS chez l'enfant. La valeur de *t* reflète la différence statistique entre les deux conditions. Les activations sont celles obtenues après correction pour comparaison multiple (FDR) pour un risque d'erreur inférieur 0,05. Seules les activations significatives à l'intérieur d'un cluster composé de 10 voxels ont été retenues. (1) : cluster significatif après SVC sur la base d'une hypothèse a priori. (2) cluster significatif pour $p < 0,001$ non corrigé. FBA= *fusiform body area*. G/D: hémisphères gauche ou droit.

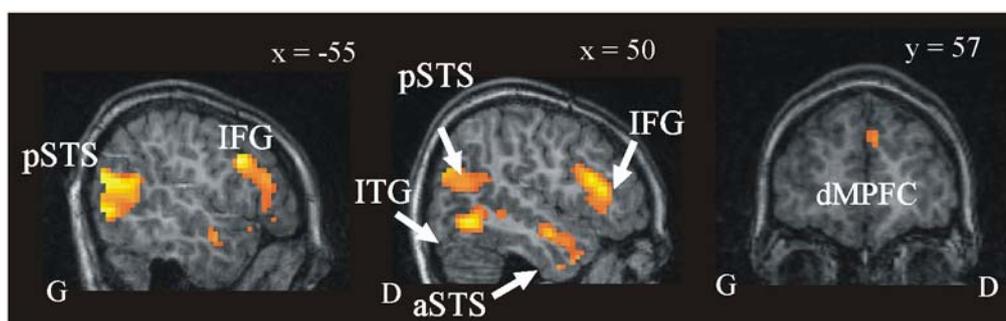


Figure 28 : [IS > NIS] Activations significatives ($p < 0,05$ corrigé ou $p < 0,001$ non corrigé) analysées en effet aléatoire (RFX) lors de l'observation d'animations avec interactions sociales (IS) versus sans interaction sociale (NIS). Les activations de groupes sont représentées sur une image anatomique normalisée d'un des cerveaux des sujets enfants. D/G = hémisphères droit et gauche ; pSTS = sillon temporal supérieur postérieur ; dMPFC = cortex préfrontal médian

dorsal ; IFG = gyrus frontal inférieur ; PM = cortex pré-moteur ; ITG = gyrus temporal inférieur.

IV. 2. 3. Différences entre adultes et enfants

Nous avons directement comparé le contraste IS > NIS chez l'enfant et chez l'adulte.

La comparaison Adultes > Enfants ne permet pas de mettre en évidence une variation d'activation chez l'adulte plus importante que chez l'enfant, pour aucune région du cerveau. En revanche, la comparaison Enfants > Adultes indique des différences d'activation chez l'enfant dans l'hémisphère gauche au niveau du gyrus occipital inférieur et médian, à droite au niveau de la jonction occipito-temporale et, dans le gyrus pariétal dans le précuneus (Tableau 8 et Figure 29).

[Enfant > Adulte] pour le contraste [IS > NIS]							
Régions cérébrales		Coordonnées			Aire de Brodmann	Valeur de <i>t</i>	Taille du cluster
		MNI					
		x	y	z			
G	Gyrus occipital inférieur	-42	-81	-9	BA19	5.38	26
G	Gyrus occipital médian	-27	-87	15	BA19	4.96	61
D	Jonction occipito-temporale	48	-57	-9	BA19/37	4.60	21
D	Précuneus	21	-57	9	BA7	4.37	12

Tableau 8 : Activations cérébrales obtenues après utilisation d'un test t de comparaison de deux groupes (two-sample t-test). Le tableau présente les activations plus importantes dans le groupe des enfants comparé au groupe des adultes dans la condition IS versus NIS. La valeur de t reflète la différence statistique entre les deux groupes. Les activations sont celles obtenues sans correction à un risque d'erreur inférieur $p < 0,001$. Seules les activations significatives à l'intérieur d'un cluster composé de 10 voxels ont été retenues. G/D: hémisphères gauche ou droit.

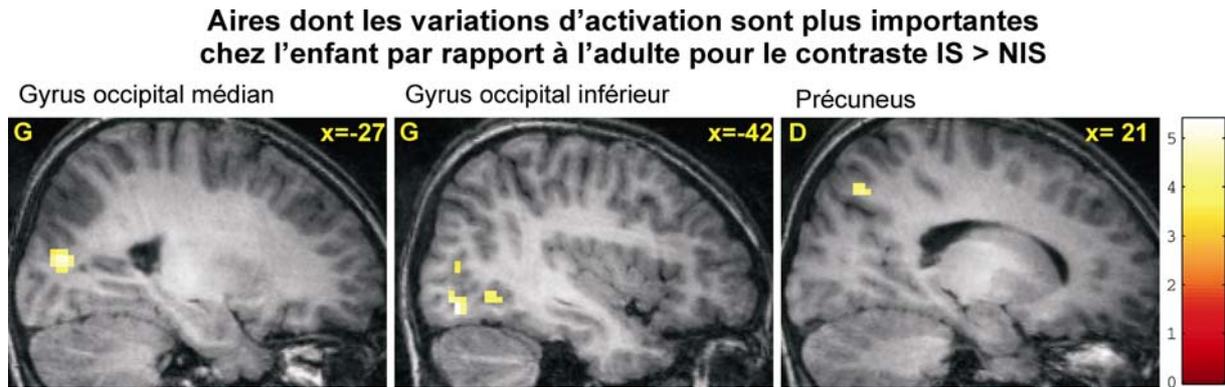


Figure 29 : [Enfant > Adulte] pour le contraste [IS > NIS]. Variations d'activité significativement ($p < 0,001$ non corrigé) plus importantes dans le groupe des enfants que dans le groupes de adultes lors de l'observation d'animations avec interactions sociales (IS) versus sans interaction sociale (NIS). Les activations de groupes sont représentées sur une image anatomique normalisée d'un des cerveaux des sujets enfants. D/G = hémisphères droit et gauche. A gauche : gyrus occipital médian ; au centre : gyrus occipital inférieur ; à droite : précuneus.

IV. 2. 4. Variations d'activité liées à l'âge des enfants

L'ajout d'un régresseur « âge des sujets » nous a permis de mettre en évidence deux régions dont la variation d'activité est dépendante de l'âge des sujets dans le contraste IS > NIS : le cortex occipital médian et le précuneus (Tableau 9 et Figure 30). Les changements d'activité sont corrélés négativement à l'âge des sujets, ce qui indique que ces aires cérébrales sont moins sollicitées avec l'augmentation de l'âge des sujets. A l'inverse, nous n'avons pas pu mettre en évidence de régions dont les variations d'activité augmenteraient avec l'âge.

Enfin, le report des variations du signal du pic d'activité à l'intérieur de ces régions, en fonction de l'âge des enfants (Figure 31), nous permet de noter que cette diminution du signal avec l'âge est essentiellement présente entre les enfants les plus jeunes, âgés de moins de neuf ans, et les autres enfants.

Variations d'activité en fonction de l'âge des sujets dans le contraste IS > NIS : [régression négative]

	Régions cérébrales	Coordonnées MNI			Aire de Brodmann	Valeur de <i>t</i>	Taille du cluster
		x	y	z			
		G	Gyrus occipital médian	-30			
G	Précuneus	-15	-54	48	BA7	6.19	27

Tableau 9 : Activations cérébrales obtenues après un test de régression négative en fonction de l'âge des enfants dans la condition IS versus NIS. La valeur de *t* reflète la différence statistique entre les deux conditions. Les activations sont celles obtenues sans correction à un risque d'erreur inférieur $p < 0,001$. Seules les activations significatives à l'intérieur d'un cluster composé de dix voxels ont été retenues. G/D: hémisphères gauche ou droit.

Aires dont l'activation diminue avec l'augmentation de l'âge

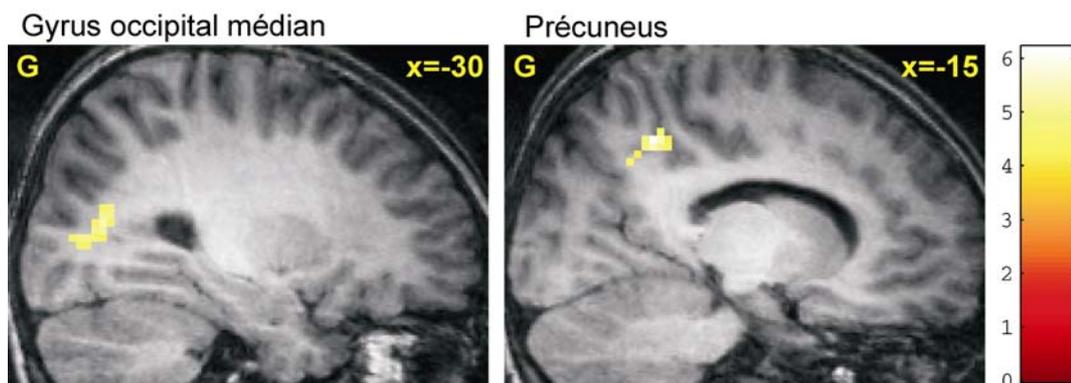


Figure 30 : Variations d'activité en fonction de l'âge des sujets dans le contraste IS > NIS : [régression négative]. Les régions dont les variations d'activation diminuent en fonction de l'âge sont le gyrus occipital médian (gauche) et le précuneus (droite).

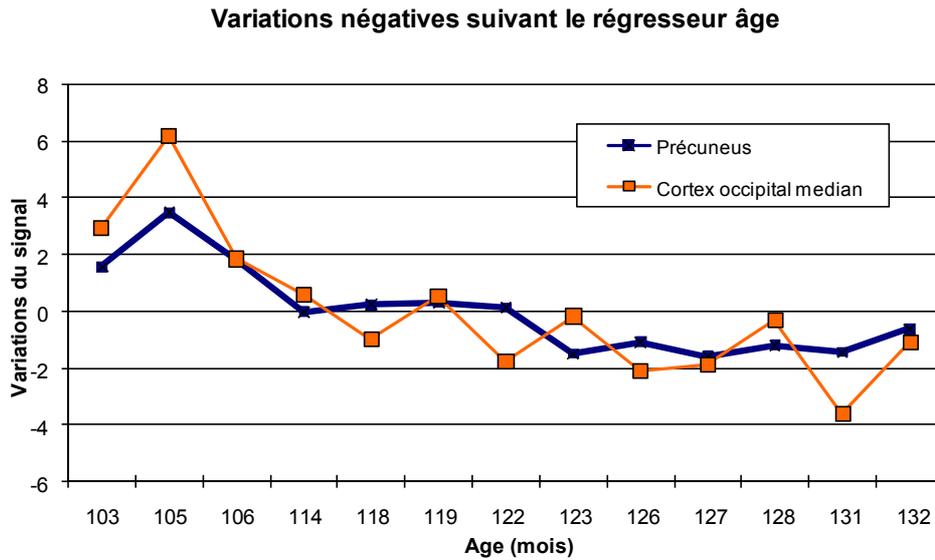


Figure 31 : Variations du signal en fonction de l'âge des enfants (exprimé en mois) pour les deux régions significatives dans l'analyse de régression négative (pour le contraste IS > NIS avec comme régresseur l'âge) : le précuneus et le gyrus occipital médian.

VI. 3. Discussion

Nous retrouvons chez l'enfant les structures précédemment décrites dans l'étude en IRMf chez l'adulte. En effet, nos résultats mettent en évidence qu'aux âges testés, les circuits de la cognition sociale sont bien en place : le point d'ancrage du traitement du mouvement humain, c'est-à-dire le STS, et le réseau de la mentalisation, sont donc fonctionnels (Figure 28). De plus, de façon originale, nous avons pu mettre en évidence pour la première fois en IRMf un recrutement du réseau présidant à la résonance motrice chez l'enfant.

Le jeune enfant est un être dont le cerveau social est bien développé, et qui utilise les fonctions nécessaires à la compréhension sociale. En revanche, il semblerait qu'il utilise plus fortement certaines régions responsables de traitements visuels, et dont la sollicitation diminuerait avec l'âge.

Mise en place précoce du réseau de la mentalisation

Alors que depuis 20 ans un consensus affirmait que les enfants, en-dessous de quatre ans, échouaient à l'épreuve de théorie de l'esprit basée sur les fausses croyances (Wimmer et Perner, 1983 ; Wellman et al., 2001), des études comportementales récentes utilisant

l'oculométrie ont mis en évidence une forme de théorie de l'esprit beaucoup plus précoce, chez le nourrisson dès 15 mois, dans le même type d'épreuves (Onishi et Baillargeon, 2005 ; Southgate et al, 2007). Ainsi, il semblerait que les circuits présidant à la capacité à attribuer un état mental à un acteur observé, qui permet de prédire l'intention et le but de l'action associé à ses gestes, soient présents très tôt au cours du développement.

Notre étude indique qu'aux âges testés, c'est-à-dire à la fin de l'enfance, les réseaux associés à la théorie de l'esprit sont sollicités de la même façon que chez l'adulte. En effet, nous retrouvons des activations au niveau du STS et du dMPFC, fortement impliqués dans la mentalisation. Ces résultats sont en adéquation avec des études précédentes qui ont exploré les réseaux activés durant l'attribution d'intentions chez des enfants appartenant à la même tranche d'âge, et qui indiquent également un recrutement identique de ces régions chez les adultes et chez les enfants (Ohnishi et al., 2004; Kobayashi et al., 2007).

Mise en évidence d'un réseau des mécanismes miroirs chez l'enfant

De façon similaire aux données comportementales de l'étude développementale, les enfants enregistrés en IRMf reconnaissent une IS exprimée sur la base du langage corporel. L'étude en IRMf réalisée chez l'adulte nous a permis de mettre en évidence que cette reconnaissance se basait sur une simulation motrice traduite par le recrutement du système des neurones miroirs. Chez l'enfant, l'activation de ce même réseau nous donne tout lieu de penser que cette compétence est également sous-tendue par une simulation motrice soutenue lors de l'exploration des items sociaux. Par conséquent, les enfants entre huit et 11 ans dégagent l'information sociale à partir de l'information du corps en action en sollicitant en particulier le mécanisme miroir.

Jusqu'à présent, peu d'études ont permis d'interroger la mise en place du réseau du système miroir chez l'enfant. Chez le nourrisson, deux études récentes utilisant l'EEG ont permis de mettre en évidence une désynchronisation du rythme *mu*. A six mois, l'observation d'une action dirigée vers un but accompagnée ou pas de la saisie d'un objet se traduit par une forme de désynchronisation du rythme *mu*, malgré le fait que ce rythme est encore difficile à caractériser à cet âge (Nyström, 2008b). En revanche, à huit mois, cette désynchronisation se rapproche déjà fortement de celle obtenue chez l'adulte (Nyström, 2008a). Entre deux et huit ans, toujours grâce à l'EEG, une réactivité corticale spécifique de l'observation de mouvements humains a pu être mise en évidence dans des régions fronto-pariétales correspondant aux régions sollicitées dans le système des neurones miroirs (Cochin et al,

2001 ; Martineau et Cochin, 2003 ; Martineau et al, 2008). Des études en EEG ont montré, lors de l'observation de mouvements de la main, une atténuation du rythme *mu* en regard des aires sensori-motrices, pouvant refléter une sollicitation du système miroir (Oberman et al., 2005; Lepage et Theoret, 2006 ; Oberman et Ramachandran, 2008). Jusqu'à aujourd'hui, aucune étude n'avait encore mis en évidence une activation cérébrale dans la région du gyrus frontal inférieur, siège du système miroir, chez l'enfant. C'est précisément ce que nous avons obtenu avec notre étude en IRMf chez l'enfant.

Chez l'enfant tout comme chez l'adulte, la simulation motrice permet, de toute évidence, de comprendre une IS dans certaines conditions et de fait, elle est complémentaire à la mentalisation. Notre étude indique non seulement que cette simulation motrice est également accompagnée d'une activation du réseau miroir chez l'enfant, mais elle produit de plus la première preuve expérimentale directe chez l'enfant d'une activation des régions constituant ce système.

Traitement visuel de recherche de contours plus prononcé chez l'enfant

Les études comportementales nous ont amenés à faire l'hypothèse qu'au lieu de catégoriser les items sociaux et non-sociaux à partir d'une analyse de leurs composantes sociales, les enfants pouvaient être amenés à utiliser une stratégie visuo-spatiale qui permettrait, pour certains items, de les aider à classer rapidement les scènes visuelles. En effet, les sujets participants pouvaient s'appuyer sur le fait que les deux acteurs ne se rapprochaient pas et ne se touchaient jamais acteurs dans les items non sociaux alors que dans les items sociaux, ces indices visuo-spatiaux pouvaient leur permettre, très rapidement, de classer la scène présentée en item social. Ainsi, par stratégie basée sur un traitement visuo-spatial, nous entendons le fait d'estimer la distance qui sépare les deux acteurs, et de détecter un rapprochement de points qui les constituent au cours de la scène visuelle. Nous avons supposé que cette stratégie pouvait être utilisée par les jeunes enfants et par les enfants avec autisme.

D'une part, il nous est apparu en perspectives qu'une analyse du trajet oculaire apporterait des éléments de réponse face à cette interrogation. D'autre part, c'est à la lumière de cette hypothèse de l'utilisation d'une stratégie visuo-spatiale que nous avons examiné les activations cérébrales, en particulier celles qui distinguaient le groupe des adultes et celui des enfants. Dans ce contexte, les activations plus prononcées chez les enfants dans certaines

régions occipitales, pariéto-occipitales (ou pariétales) et occipito-temporales, toutes en lien avec des processus visuels, ont particulièrement attiré notre attention.

Ces régions, c'est-à-dire le cortex occipital médian, la jonction temporo-pariétale et le précuneus, ne présentent pas une augmentation d'activité dans le même contraste réalisé chez l'adulte. Elles apparaissent donc spécifiques au traitement réalisé par les enfants. Non seulement elles présentent une variation d'activité plus importante chez l'enfant que chez l'adulte, mais cette variation est sensible à l'âge. De plus, ces changements d'activité diminuent avec l'âge des sujets. Il est intéressant de noter qu'en réalité, ce sont les plus jeunes enfants âgés de moins de neuf ans qui sont en grande partie responsables de cette diminution liée à l'âge.

Un traitement visuo-spatial plus prononcé chez l'enfant aurait activé des régions du cortex pariétal spécialement dévolues aux fonctions liées à l'analyse visuelle de trajectoires spatiales. Ces régions sont classiquement situées le long de la voie dorsale, en particulier au niveau du cortex pariétal supérieur (pour revue, voir Husain et Nachev, 2007). Néanmoins, les régions que nous avons identifiées dans notre étude ne font pas partie des aires spécialisées dans le traitement visuo-spatial. Nous pouvons donc en conclure que les enfants n'ont pas besoin de faire appel à ce type de traitement pour catégoriser les interactions sociales.

En revanche, le cortex occipital médian et la jonction temporo-pariétale sont des aires visuelles fortement impliquées dans la création d'un contour implicite à partir de points lumineux en mouvement (Klaver et al., 2008; Tanskanen et al., 2008). De façon très intéressante, Klaver et collègues (2008) ont également mis en évidence une maturation de ce réseau chez les enfants de 5 / 6 ans. Leur étude révèle une activation moins prononcée de ces régions chez ces jeunes enfants comparés à des adultes lors de la visualisation de patrons constitués par des points lumineux à partir desquels il était possible d'extraire une structure géométrique (Klaver et al., 2008). La maturation s'effectuerait probablement à des âges plus avancés de l'enfance. Ce résultat est à rapprocher du gain de temps en rapidité de reconnaissance des scènes visuelles que procurent les stimuli présentés sous forme de stick dans notre étude comportementale : la présentation explicite du contour aiderait à la formation plus rapide d'une forme. Nous avons, à l'inverse, observé un recrutement supérieur de ces régions chez l'enfant par rapport à l'adulte. Néanmoins, ce recrutement supérieur est plus prononcé pour la situation IS que pour la situation NIS. La complexité des stimuli influencerait donc le recrutement de ces aires, les interactions sociales nécessitant certainement un traitement accru lors de la transformation de points lumineux en contenu social. Il est tout à fait envisageable qu'aux âges que nous avons enregistrés ce réseau soit

mature, mais que c'est la complexité intrinsèque aux MH, notamment dans les scènes sociales, qui suscite un recrutement plus important de ces aires chez l'enfant.

Le précuneus fait également partie de ce réseau sollicité pour extraire, à partir de points lumineux en mouvement, une forme (Klaver et al, 2008 ; Tanskanen et al, 2008). Il est tout à fait envisageable d'attribuer à son activation plus prononcée chez l'enfant la même fonction que celle précédemment évoquée pour le gyrus occipital médian : un effort supplémentaire pour dessiner les contours du MH à partir des points lumineux, notamment dans un contexte social. Cependant, le précuneus est une région pivot qui est également impliquée dans un grand nombre de fonctions intégrées, dont on ne peut exclure la participation, dans le cadre de notre étude, au traitement des interactions sociales : la prise de perspective et l'agentivité (pour revue, voir Cavanna et Trimble, 2006). En particulier, ces fonctions cognitives sont relayées par le précuneus dans le cadre d'une connectivité soutenue avec les aires préfrontales telles que le dMPFC. Le dMPFC étant particulièrement dévolu à la mentalisation, l'activation concomitante du précuneus pourrait ainsi être liée à la prise de perspective utilisée lors de la mentalisation.

En conclusion, cette étude développementale en IRMf révèle la richesse du fonctionnement du cerveau social en plein développement. Elle a permis de mettre en évidence, pour la première fois chez l'enfant, l'activation du gyrus frontal inférieur, siège des neurones miroirs. Ce mécanisme miroir est utilisé de façon importante dans le traitement visuel de l'information sociale lorsque c'est le corps qui « parle ». Les enfants sont des êtres dont la gestuelle participe pleinement au discours social, et ce de façon souvent exagérée. Cette étude ouvre ainsi la voie à la question du rôle du mécanisme miroir dans le développement social de l'enfant.

DISCUSSION GENERALE

Comprendre une interaction sociale (IS) en qualité d'observateur, c'est comprendre, grâce à des indices précis, l'intention d'un individu et la réaction de son interlocuteur. Ces indices peuvent être la parole, les expressions du visage, la direction du regard mais aussi les mouvements du corps comme la posture et la gestuelle. Si le réseau de la mentalisation est incontestablement le mécanisme mis en avant dans le processus d'attribution des intentions et des états mentaux, la contribution de la simulation motrice dans la compréhension des IS reste, encore aujourd'hui, spéculative (Jacob et Jeannerod, 2005; Saxe, 2005; Brass et al., 2007). Or, dans ce travail de thèse, nous avons mis en lumière pour la première fois, que le mécanisme miroir, comme le réseau de la mentalisation, sous-tend la compréhension d'une IS. Nous démontrons ainsi que la simulation motrice qui repose sur le mécanisme miroir permet de comprendre une IS uniquement illustrée par le corps en action. En l'absence de langage verbal et d'expression faciale, le langage corporel suffit alors à renseigner sur le contenu social d'une IS. Ainsi, le mécanisme miroir pourrait jouer un rôle précurseur dans notre capacité à inférer des intentions et des états mentaux à autrui (Gallese et Goldman, 1998). Pour cela nous avons fait l'hypothèse au cours de ce travail de thèse qu'il existe une relation forte entre la perception du mouvement humain (MH), et le mécanisme miroir sous-tendu par le couplage de la perception et de l'action. Nos résultats issus des investigations cérébrales rapportés chez l'adulte comme chez l'enfant à partir de huit ans, constituent des arguments expérimentaux de choix qui placent le mécanisme miroir au cœur de la compréhension sociale. Si le mécanisme miroir est un mécanisme précurseur pour comprendre autrui, se pose alors, tout naturellement, la question de l'existence d'un tel mécanisme chez le nouveau-né et de son fonctionnement au cours du développement global de l'enfant.

Mécanisme miroir : une potentialité présente dès la naissance

Pour répondre à cette question, les travaux qui examinent les compétences du nouveau-né concernant la perception du mouvement biologique (MB), humain (MH) et le couplage de la perception et de l'action, sont particulièrement précieux et constituent des indices indirects du possible rôle du mécanisme miroir (Falck-Ytter et al., 2006). Des auteurs ont proposé qu'en raison de sa spécificité relative à l'action réalisée par un être humain, le

mécanisme miroir devrait se développer dans une fenêtre temporelle proche de la compétence à percevoir du MB (Lepage et Theoret, 2006). Or, une récente étude a montré que la sensibilité au MB est présente dès les premiers jours de vie suggérant que cette compétence est innée (Simion et al., 2008). D'autre part, la perception de MH sollicite chez le nourrisson de huit mois des régions cérébrales similaires à celles de l'adulte traduisant une maturité précoce de ces circuits (Hirai et Hiraki, 2005 ; Reid et al., 2006). Jusqu'à présent peu d'études ont réussi à interroger le mécanisme miroir chez le nourrisson grâce à des techniques de neuro-imagerie. Il a toutefois été montré, que lors d'observation d'action dirigée vers un but, le nourrisson de six mois présente une forme de désynchronisation du rythme *mu* qui permet de signer, tout comme chez l'adulte, la présence d'un mécanisme miroir lors de l'observation d'actions simples dirigées vers un but, incluant ou pas la saisie d'objet (Nystrom, 2008b). Les caractéristiques de ce mécanisme gagnent en maturité dès l'âge de huit mois (Nystrom, 2008a). Ces résultats prometteurs ouvrent le champ de l'exploration du développement précoce d'un mécanisme miroir.

Sans chercher à définir un niveau hiérarchique entre ces différentes étapes clés du développement, les études ontogénétiques indiquent que le nourrisson acquiert très tôt une connaissance de son corps qu'il développe sur la base d'informations sensorielles, notamment visuelles. En effet, les travaux sur l'importance de la proprioception visuelle montrent que les nourrissons sont capables d'extraire des informations pertinentes pour réguler leur posture à partir du flux visuel (Jouen, 1986; Barbu-Roth et al., 2009). Ce couplage de la perception et de l'action présent dès la naissance se renforce à nouveau au cours des grandes étapes du développement moteur où l'enfant acquiert une liberté d'action et d'interaction croissante avec son environnement physique et social (Stoffregen et al., 1987; Bertenthal et Bai, 1987).

Cette construction du répertoire moteur s'accompagne, bien évidemment, de l'élaboration des représentations de l'action. Ces représentations permettent au nourrisson de « se connaître » en tant que corps situé par rapport à l'environnement (espace de préhension et de déplacement selon les caractéristiques physiques des objets), corps organisé (exploration des parties du corps) et corps agent (« pouvoir » de causalité physique sur les objets) (pour revues, voir von Hofsten, 2007; Rochat, 2007). Le nourrisson manifeste un sens du corps non seulement comme agent des transformations perceptives qu'il explore mais aussi comme agent de communication avec les autres. En effet, la période développementale où le nourrisson explore son environnement est aussi celle où apparaissent les premiers sourires

sociaux réciproques (Striano et Reid, 2006). Le nourrisson ouvre davantage son champ d'action et d'interaction avec l'environnement social et construit aussi des représentations sociales de l'action.

Mécanisme miroir et imitation

Le mécanisme miroir a été proposé comme le corrélât neurophysiologique à la base des processus d'imitation (Rizzolatti et al., 2001). Dès les premiers jours de vie, le nouveau-né reproduit des mouvements oro-faciaux et manuels en observant ces mêmes mouvements chez un adulte (Meltzoff et Moore, 1977) (Danis et al., 1998). Les premières imitations du nouveau-né laissent à penser que le mécanisme miroir pourrait être présent dès la naissance (Lepage et Theoret, 2007). Pour être opérant, nous proposons que ce mécanisme s'enrichit des représentations sensorimotrices puis de représentations de l'action qui se sont construites au grès des progrès sensori-moteurs du nouveau-né et de ses échanges avec l'environnement physique (les objets) et social (les individus). C'est par conséquent dans une dimension sociale et à visée de communication que le mécanisme miroir deviendrait opérant.

A la période développementale où le nourrisson utilise activement son corps pour interagir avec autrui et comprend les gestes d'autrui, il est intéressant de noter que la seconde forme d'imitation apparaît (Nadel et al., 1985 ; Asendorpf et Baudonniere, 1993 ; Danis et al., 1998b). Cette imitation dite immédiate est précisément celle qui permet au jeune enfant d'effectuer un geste en même temps que le modèle (grâce à un couplage perception / action direct). Elle aurait pour fonction l'apprentissage social. En effet, en reproduisant le comportement d'autrui le jeune enfant s'exerce et développe son répertoire moteur et social. D'autre part, pour être reproduits par le jeune enfant, les gestes de l'adulte doivent être cohérents et appropriés à la situation (Gergely et al., 2002). Enfin l'imitation permet à un jeune enfant d'accéder à l'agentivité et à l'intentionnalité en considérant autrui comme un « autre soi » (de l'anglais, « *like-me* ») (Meltzoff, 2007). En imitant et en étant imité, le jeune enfant est tour à tour à la fois acteur et observateur. Il apprend ainsi progressivement à distinguer ses actions de celles d'autrui tout autant que ses intentions et celles d'autrui. Ainsi l'imitation apparaît comme un processus essentiel à l'élaboration d'une théorie de l'esprit.

De la résonance motrice aux interactions sociales

Les échanges sociaux que le nourrisson entretient avec son entourage sont continuels et intenses, ils contribuent à construire de nouvelles représentations. A partir de six mois, le nourrisson développe un sens de l'agentivité illustré par l'intérêt qu'il porte aux entités animées *a fortiori* lorsqu'il s'agit de personnes, mais surtout, parce que contrairement aux objets, l'individu agit avec un but et une intention (pour revue, voir Frith et Frith, 2003). Se construit alors une représentation de l'action liée à la notion d'intentionnalité. A partir de neuf mois, le nourrisson utilise son corps notamment au travers du pointage pour manifester son intérêt pour autrui et explorer sa réaction (Tomasello et al., 2007). A partir de 12 mois, il utilise l'information portée par la direction du regard et des expressions émotionnelles du visage pour prédire l'action intentionnelle d'un adulte (pour revue, voir Woodward, 2009). A 14 mois, le nourrisson « interprète » les gestes d'autrui comme porteurs de sens et d'intention (Behne et al., 2005). Il sait solliciter l'adulte pour accomplir une action qu'il ne peut réaliser seul (Goubet et al., 2006). Ainsi ces différentes études suggèrent bien l'existence précoce d'une résonance motrice utilisée au service de la compréhension des comportements d'autrui, du moins dans un contexte précis, familial au jeune enfant.

Représentations sociales : émergence précoce et maturation tardive au cours de l'ontogénèse

Ce travail de thèse apporte des arguments expérimentaux sur l'implication du mécanisme miroir dans la compréhension sociale chez l'enfant. En effet, nous avons mis en évidence l'activation concomitante du mécanisme miroir et du réseau de la mentalisation chez l'enfant à partir de huit ans lors de l'observation d'une IS exprimée par le corps en action. Ces réseaux sont équivalents à ceux observés chez l'adulte, suggérant une maturation relativement précoce de ces circuits chez l'enfant.

De plus, les données comportementales révèlent que dès l'âge de quatre ans, les enfants sont capables de performances notables pour reconnaître les IS sur la seule base des informations cinématiques. Ainsi nos données expérimentales suggèrent que le mécanisme miroir est fonctionnel puisque les enfants reconnaissent une IS à partir du langage corporel. Néanmoins, cette capacité qui émerge relativement tôt continue à mûrir jusqu'à des âges plus tardifs puisque c'est seulement aux alentours de 7 / 8 ans que les performances de

l'enfant atteignent le niveau de celui des adultes. Notre hypothèse est que les enfants de développement typique avant l'âge de huit ans ne font pas encore une analyse suffisamment fine de l'information portée par le mouvement du corps pour identifier systématiquement une IS.

Ce décours temporel de la construction des représentations sociales de l'action n'est pas sans rappeler le développement des représentations sensorimotrices de l'action qui servent de base à la fonction d'anticipation, notamment dans des tâches de coordination bimanuelle (Schmitz et al., 1999 ; 2002 ; Schmitz et Assaiante, 2002). A mesure que l'enfant grandit, il enrichit son répertoire moteur et social grâce aux échanges qu'il entretient avec ses pairs et avec son environnement. Nous proposons qu'en fonction de l'expertise motrice et sociale des enfants, les représentations de l'action se construisent et s'affinent. En effet, l'expérience vécue a un effet facilitateur puisque les IS les mieux reconnues par nos plus jeunes sujets âgés de quatre à six ans illustrent des scènes avec lesquelles ils sont familiers dans leur vie quotidienne.

Ces résultats soulignent l'aspect dynamique du mécanisme miroir qui ne cesse d'offrir de nouvelles potentialités à mesure qu'il est sollicité. Même s'il est encore difficile de déterminer une relation entre le développement du mécanisme miroir et le développement moteur et social de l'enfant, il est néanmoins remarquable de souligner la plasticité de ce mécanisme même à l'âge adulte. En effet, l'apprentissage de nouveaux mouvements chez l'adulte de développement typique s'accompagne d'un recrutement plus important des régions appartenant au mécanisme miroir (Cross et al., 2006). Des effets bénéfiques en rééducation ont été mis en évidence chez des patients atteints de déficits moteurs (Ertelt et al., 2007; Buccino et al., 2008). Encore une fois, il semblerait qu'en sollicitant et en élaborant de nouvelles représentations de l'action, le mécanisme miroir serait d'autant plus activé.

Vision et mécanisme miroir : des liens privilégiés

Des arguments expérimentaux tendent à dire que le mécanisme miroir permet de comprendre les actions intentionnelles grâce aux propriétés visuelles de l'action (de Lange et al., 2008). En effet, dans le couplage de la perception et de l'action qui sous-tend le mécanisme miroir, les informations visuelles jouent un rôle prépondérant. Ce couplage de la

perception et de l'action serait-il aussi robuste avec une autre modalité sensorielle telle que l'audition par exemple ? Si on fait écouter à des sujets une bande sonore d'une IS visualisée auparavant, cela activerait-il les régions de la simulation motrice et de la mentalisation ? Entendre deux personnes marcher ensemble sollicite uniquement des régions spécialisées dans la mentalisation (pôle temporal) et dans le traitement émotionnel (amygdale) (Saarela et Hari, 2008) et dans la perception du mouvement humain (STS) (Bidet-Caulet et al., 2005). Or imaginer une action sollicite le mécanisme miroir (Jeannerod et Decety, 1995; Decety et Grezes, 2006) ce qui laisse présager qu'entendre une action sociale peut susciter le même mécanisme en simulant mentalement l'IS entendue. D'après de Lange et collaborateurs (2008), le mécanisme miroir permettrait de comprendre une action intentionnelle sur la base d'information visuelle portée par l'action observée alors que le réseau de la mentalisation serait sollicité lorsque le sujet s'intéresse à l'intention de l'action et ce, indépendamment de l'information visuelle (de Lange et al., 2008). Par conséquent, la contribution du mécanisme miroir serait complémentaire de celle du réseau de la mentalisation dans la compréhension d'une action intentionnelle.

Pour aller plus loin dans la mise en place du mécanisme miroir...

Pourrait-on imaginer une expérience en EEG chez le nourrisson de six mois à qui nous présenterions nos animations de corps en mouvement ? Sur la base des paradigmes de préférence visuelle et d'habituation comme pour la préférence visuelle chez le nouveau-né et le MB (Simion et al., 2008), il serait intéressant de mesurer l'activité corticale pour des NIS et des IS. Puisqu'une activité du mécanisme miroir a été enregistrée à cet âge (Nystrom, 2008a), nous faisons l'hypothèse que la simulation motrice sera également sollicitée lors de la visualisation des scènes de MH. Toutefois, on peut émettre l'hypothèse que l'activité corticale du mécanisme miroir sera équivalente dans les deux catégories IS et NIS en raison d'une pauvreté du répertoire des représentations motrices et sociales en construction. Au niveau comportemental cependant, les nourrissons devraient être plus attirés par les IS de façon similaire à la préférence innée qu'ils manifestent pour les entités animées, les visages, la voix humaine (pour revue, voir Frith et Frith, 2003) ainsi que pour le MB (Meary et al., 2007; Simion et al., 2008).

Une autre représentation de l'action dans l'autisme : quelles conséquences pour le mécanisme miroir ?

Lors de ses premières observations, Kanner (1943) avait déjà relevé des signes de motricité déviante comme des troubles dans les attitudes d'anticipation posturale lorsque les parents prenaient le nourrisson dans leurs bras. Afin de repérer des signes précoces de l'autisme, un certain nombre de travaux se sont basés sur l'examen des films vidéo familiaux réalisés durant les premières années de l'enfant, avant qu'il ne soit diagnostiqué autiste, comparés à des films familiaux d'enfants de développement typique ou atteints d'autres pathologies du développement. Des comportements moteurs singuliers sont identifiables dans la première année du nourrisson comme par exemple une hypotonie (Adrien et al., 1993) ou encore une démarche particulière (Esposito et Venuti, 2008). Des perturbations dans le développement moteur ont également été signalées dès l'âge de quatre à six mois (Teitelbaum et al., 1998). En raison de déficits précoces du développement moteur, le nourrisson avec autisme n'établirait pas, de façon similaire à un nourrisson non-autiste, une interaction entre son corps en mouvement et l'environnement dans lequel il évolue. Ainsi peut-on faire l'hypothèse que le couplage de la perception et de l'action serait affecté chez l'enfant avec autisme, limitant de ce fait l'efficacité du mécanisme miroir.

Plusieurs auteurs ont émis l'hypothèse que le développement sensori-moteur décrit comme atypique dans l'autisme (Provost et al., 2007; Esposito et Venuti, 2008; Schmitz et Assaiante, 2008) pourrait contribuer à une atteinte de la construction des représentations de l'action. En effet, il a été récemment montré que les enfants autistes ne planifient pas une action en fonction des caractéristiques de l'objet à saisir (Fabbri-Destro et al., 2009). Les enfants autistes ne modulent pas la cinématique de leur mouvement en fonction de la difficulté de la tâche probablement en raison de représentations limitées. Or prédire les conséquences d'une action selon les contraintes de l'environnement fait appel aux représentations de l'action. Un déficit dans l'élaboration ou l'utilisation des représentations de l'action a également été proposé pour expliquer le déficit d'anticipation posturale observé chez les enfants autistes (Schmitz et al., 2003). Les enfants autistes utiliseraient une stratégie compensatrice de ralentissement pour contrôler leur posture dans une tâche de coordination bimanuelle (Schmitz et al., 2003). Une étude récente de Rizzolatti et collaborateurs (2009) indique qu'il existerait, dans l'autisme, un problème d'organisation des séquences motrices

qui permettrait de coder l'acte moteur en but (ils réalisent la tâche) et non en intention (ils n'anticipent pas la finalité de l'action). Les auteurs proposent l'interprétation suivante : les enfants autistes comprennent probablement l'intention d'un point de vue cognitif mais le mécanisme qui permet de comprendre par référence à une expérience vécue est inopérant. Ainsi, les enfants autistes rencontreraient des problèmes pour organiser leur intention alors qu'ils n'en auraient pas pour organiser leur acte moteur. Il est probable que cette désorganisation soit également liée à un défaut de représentation de l'action. Ce déficit de la construction des représentations de l'action ne peut pas rester sans conséquence sur le développement du mécanisme miroir.

Si l'enfant autiste ne manifeste pas d'intérêt ou de préférence pour l'environnement social, s'il n'est pas attiré par les visages, par le MB, ou la voix de sa mère, il s'intéresse, néanmoins, beaucoup au monde physique avec lequel il « entretient » un rapport atypique (jeu avec les objets, attirance pour les systèmes hautement prédictibles, pour les ordinateurs etc.). Cette interaction particulière avec le monde physique lui permet d'élaborer des représentations de l'action à un niveau peut-être plus causal. Par ailleurs, les stéréotypies de comportements (balancement, agitation des mains) peuvent être interprétées comme un moyen d'engranger des représentations sensori-motrices de son corps en mouvement qui contribuent certainement à l'élaboration du schéma corporel. Il est donc important de préciser qu'une représentation de l'action est forcément construite chez l'enfant avec autisme, même si elle est « autre », sans quoi le mécanisme miroir ne pourrait être opérant.

Notre étude comportementale laisse, toutefois, entrevoir des aspects positifs puisque les enfants avec autisme sont tout à fait capables de reconnaître une IS à partir du MH, même s'ils sont globalement moins performants que des enfants de développement typique appariés en âge mental et en âge chronologique. Leur profil de performance sur l'ensemble de l'épreuve est comparable à celui obtenu chez des enfants de développement typique âgés entre quatre et six ans. Nos résultats suggèrent que, malgré leur carence relationnelle, les enfants autistes ont pu, néanmoins, construire des représentations de l'action qui leur permettent d'extraire une information sociale à partir du corps en action. Il est même envisageable que cette présentation simplifiée les aide à solliciter le réseau miroir associé aux représentations de l'action, dans la mesure où elle ne sollicite qu'un type d'information perceptive. Cependant la similitude dans les profils de réponse avec des enfants non-autistes plus jeunes laissent

supposer un retard dans l'élaboration de ces représentations par rapport à des enfants appariés en âge chronologique ou âge mental.

Pauvreté d'imitation : un autre signe d'atteinte du mécanisme miroir dans l'autisme

A la lumière de nos résultats, nous proposons que le mécanisme miroir serait présent dans l'autisme mais qu'un déficit dans la construction et l'affinement des représentations de l'action pourrait affecter ce mécanisme et le rendre moins performant notamment pour permettre la compréhension sociale d'une action. C'est en observant autrui en action que l'enfant comprend le contenu intentionnel et social de l'action. Observer le comportement d'autrui et comprendre l'autre comme un « autre soi » est une étape qui permet au jeune enfant d'accéder à l'intentionnalité (Meltzoff, 2007). C'est probablement une étape qui ouvre aux échanges sociaux « en miroir » entre le jeune enfant et l'adulte lors de l'imitation. Si les processus d'imitation reposent en partie sur le mécanisme miroir, il est alors probable qu'un dysfonctionnement de ce mécanisme conduise à une imitation appauvrie ou retardée.

D'après Williams et collaborateurs (2004), le déficit d'imitation rencontré dans l'autisme ne serait pas une déviance mais plutôt un retard du développement de l'imitation (Williams et al., 2004). De plus, il est proposé que ce retard serait induit par un déficit du couplage sensori-moteur entre soi et autrui (Williams et al., 2004). L'hypothèse d'un déficit des représentations de l'action a été, à nouveau, proposée pour expliquer les déficits d'imitation rencontrés dans l'autisme (Smith et Bryson, 1994). C'est probablement sur la base de leurs représentations appauvries que les enfants autistes parviennent néanmoins à imiter spontanément et spécifiquement des actions ayant un sens et qui sont dirigées vers les objets alors qu'ils reproduisent moins efficacement les actions dirigées vers un but ou une intention (voir méta-analyse, Williams et al., 2004). De plus, les enfants autistes imitent autant l'action accidentelle que l'action intentionnelle, contrairement aux enfants avec retard mental ou de développement typique qui n'imitent que l'action intentionnelle (D'Entremont et Yazhek, 2007). Le fait que lorsqu'il imite, l'enfant autiste reproduit des actions intentionnelles tout autant qu'accidentelles indique que le mécanisme miroir est fonctionnel mais qu'il est affecté dans le codage de la dimension sociale. Néanmoins, nos résultats comportementaux indiquent

que la forme épurée de la cinématique des corps et la stimulation visuelle de scène en mouvement permettent néanmoins à l'enfant autiste de catégoriser de façon satisfaisante des interactions sociales.

Les hypothèses cérébrales neuro-fonctionnelles dans l'autisme

Dans notre étude, les enfants avec autisme reconnaissent les IS de façon moins efficace que des enfants non-autistes du même âge. Or les enfants de développement typique que nous avons enregistrés en IRMf ont des performances comparables à celles des adultes, il n'est donc pas surprenant que les deux réseaux cérébraux soient identiques à ceux obtenus chez les adultes.

Nous faisons l'hypothèse que chez les enfants avec autisme, leurs moins bonnes performances pour reconnaître une IS seraient certainement accompagnées d'une hypoactivation des réseaux impliqués dans cette tâche de catégorisation. Concernant le réseau de la mentalisation, une hypoactivation a été mise en évidence chez des patients autistes lors de l'attribution d'intentionnalité que ce soit au travers d'animations de formes géométriques en interaction (Castelli et al., 2002) ou en fonction de la direction du regard vers une cible congruente ou pas (Pelphrey et al., 2005). D'autre part, il y a dans l'autisme une connectivité fonctionnelle réduite entre le cortex préfrontal dorso-médian et d'autres régions clef du réseau de la mentalisation, régions cérébrales impliquées dans la reconnaissance émotionnelle des visages (Wicker et al., 2008). Enfin, une diminution de l'épaisseur corticale du réseau de la mentalisation a été mise en évidence soulignant une anomalie morphologique, en plus d'une anomalie fonctionnelle (Hadjikhani et al., 2006).

Toutefois, les enfants avec autisme ont des performances globales relativement correctes et comparables à des enfants non-autistes âgés entre quatre et six ans. S'ils réussissent l'épreuve, c'est qu'un mécanisme central est opérant. Si le réseau de la mentalisation ne fonctionne pas efficacement, un autre mécanisme doit compenser puisque les enfants reconnaissent quand même l'information sociale.

Par conséquent, nous nous attendons à ce que le mécanisme miroir, qui permet de comprendre l'action intentionnelle observée sur la base de l'information du corps en mouvement soit activé chez les enfants avec autisme. Cependant, un faisceau d'arguments tend à montrer un déficit de ce mécanisme dans l'autisme (Rizzolatti et al., 2009). Lors d'observation d'action, la désynchronisation du rythme *mu*, caractéristique d'une activité du mécanisme miroir, fait défaut dans l'autisme (Oberman et al., 2005; Martineau et al., 2008). Enfin, des anomalies morphologiques telles qu'une diminution de la substance grise et de l'épaisseur corticale ont été observées chez des adultes autistes dans les régions associées au mécanisme miroir également (Hadjikhani et al., 2006). Ainsi, s'il est difficile d'imaginer que les enfants avec autisme puissent réussir à catégoriser les scènes visuelles présentées sans faire appel au système des neurones miroirs, on peut néanmoins supposer que nous trouverons une hypoactivation de ce réseau dans l'autisme.

Une autre structure cérébrale clef dans la compréhension d'une action intentionnelle est le STS. Comme nous l'avons souligné dans le cadre théorique, le STS est une région d'intégration multi-sensorielle dont le rôle est essentiel dans l'analyse visuelle des actions intentionnelles. Cette région de convergence pour le traitement de la forme et du mouvement présente dans l'autisme des anomalies morphologiques et fonctionnelles qui pourraient altérer la compréhension sociale (Carper et al., 2002; Boddaert et al., 2004; Zilbovicius et al., 2006). Cependant, les arguments expérimentaux s'opposent traduisant pour certains un déficit d'intégration visuo-perceptif entre les régions visuelles et le STS, pour d'autres une anomalie de connectivité entre des régions cérébrales plus intégrées comme le cortex frontal. Une connectivité fonctionnelle réduite entre le STS et les régions visuelles du cortex extrastrié a été mise en évidence dans une épreuve de mentalisation chez des adultes autistes (Castelli et al., 2002). Alors que les patients présentent une activité dans les aires visuelles aussi importantes que les adultes non-autistes, ils présentent néanmoins une hypoactivation des régions du réseau de la mentalisation, dévolues à un traitement cognitif plus sophistiqué. Les auteurs déduisent que le traitement perceptif de bas niveau serait fonctionnel mais que l'intégration des informations visuo-spatiales au niveau du STS serait altérée et expliquerait que traitement de haut niveau ne puisse avoir lieu correctement (Castelli et al., 2002). Cependant, une autre étude a montré que les patrons d'activations des régions sollicitées dans le traitement perceptif sont similaires entre des adultes autistes et non-autistes (Nishitani et al., 2004). En revanche le décours temporel est ralenti de façon caractéristique chez les patients autistes au niveau du cortex frontal inférieur. Ces résultats s'opposent à l'hypothèse d'un

déficit strictement visuo-perceptif, le déficit se situerait plutôt au niveau des régions d'intégration du traitement de haut niveau (Nishitani et al., 2004). Enfin, une anomalie de la connectivité a été mise en évidence dans la région préfrontale avec des régions du cerveau comme le STS. Cette connectivité particulière soulignerait que le traitement visuel est préservé mais que les processus plus cognitifs seraient de fait altérés (Wicker et al., 2008). Ces résultats expliqueraient aussi pourquoi les personnes autistes reconnaissent une émotion dans une épreuve expérimentale alors qu'ils sont en difficulté pour comprendre une émotion dans un contexte social réel. Ils sont en effet capables de traiter l'information émotionnelle sur la base de critères visuels mais sont en difficultés pour utiliser cette information dans une situation écologique, c'est-à-dire présentée parmi de multiples sources d'informations.

Au vu de la multiplicité des rôles attribués à la région clef du STS, il nous paraît donc plus délicat d'avancer des hypothèses concernant l'origine d'un dysfonctionnement probable du STS dans l'autisme au cours de notre tâche.

Enfin, si l'on se rattache aux résultats de notre étude comportementale, nous avons montré que les enfants autistes sont capables d'extraire une forme globale à partir de points : ils détectent en effet un MH par rapport à du mouvement aléatoire. Par conséquent, nous écartons l'hypothèse d'un déficit du traitement configural. D'autre part, les enfants autistes réussissent l'épreuve de catégorisation alors qu'il s'agit de mouvement. Nous en déduisons que l'information dynamique ne perturbe pas l'analyse visuelle. A la lumière de ces résultats, les enfants autistes perçoivent et catégorisent les MH : l'analyse perceptive ne semble pas altérée dans nos conditions expérimentales. En dépit des hypothèses d'un déficit d'intégration perceptif (Milne et al., 2002; Bertone et al., 2003; Pellicano et al., 2005), il semblerait que l'utilisation de ce type d'animations semble contourner ces déficits probablement en raison de la quantité d'information qui reste néanmoins minimale. D'un point de vue fonctionnel, nous avons montré que l'enfant de développement typique a recours à un traitement visuo-perceptif important probablement lié à l'extraction de contours « forme humaine » pour dégager ensuite l'information sociale portée par le MH. Nous nous attendons également à une importante activation dans les régions occipitales chez des enfants avec autisme.

Anomalies anatomo-fonctionnelles et altérations génétiques

L'autisme est un trouble envahissant du développement caractérisé par des particularités de croissance cérébrale, des anomalies neuro-anatomiques et des dysfonctionnements cérébraux (pour revues, voir Pardo et Eberhart, 2007 ; Courchesne et al., 2007). Par conséquent, les anomalies à la fois neuro-anatomiques mais aussi fonctionnelles peuvent conduire à des profils d'activations cérébrales atypiques sans pour autant qu'on puisse être en mesure de déterminer si un type d'anomalie est la conséquence d'une autre.

Ces anomalies anatomo-fonctionnelles sont probablement en partie la conséquence d'altérations génétiques qui affectent nombre de régions cérébrales comme les cortex frontal et temporal. Comme nous l'avons décrit dans le chapitre consacré au spectre de l'autisme, les processus génétiques qui régissent l'expression des gènes sont très probablement altérés dans l'autisme (pour revue, voir Persico et Bourgeron, 2006). Ces altérations notamment sur des gènes neuro-développementaux mettent en péril le développement cérébral en perturbant notamment la synaptogénèse, la prolifération et la migration neuronale ou encore la communication synaptique.

Face à une pathologie aussi hétérogène que l'autisme en termes de tableau clinique et de profil génétique, les équipes de recherche soulignent l'importance de resserrer les critères diagnostics. Certains auteurs proposent de distinguer des sous-groupes de patients partageant une caractéristique clinique bien spécifique (endophénotypes) telle que le retard mental ou langagier afin de cibler davantage des gènes impliqués (Viding et Blakemore, 2007). En effet, la constitution de groupes homogènes de patients d'un point de vue des symptômes (phénotypes) pourrait renseigner plus précisément sur des gènes candidats et permettre ainsi de mieux cerner les relations entre altérations génétiques, anomalies anatomo-fonctionnelles et troubles du comportement. L'utilisation d'un paradigme simple, sur la base de celui développé dans cette thèse, permettrait de mesurer de façon quantitative l'altération de la dimension sociale. Cette dimension pourrait alors être choisie comme critère de classification endophénotypique afin d'explorer les co-variations avec l'altération de gènes codant pour les mécanismes orchestrant la maturation cérébrale.

La résonance motrice : un accès privilégié pour accéder aux interactions sociales chez l'enfant avec autisme

Alors qu'un enfant au développement typique va sans cesse affiner ces représentations au cours de l'ontogénèse, l'enfant avec autisme par manque d'expérience sociale et de représentation sociale va probablement sous-utiliser son mécanisme miroir. Il nous semble par conséquent essentiel de « stimuler » ce mécanisme pour lui offrir la possibilité de se développer. Notre étude comportementale indique que la présentation d'une IS sous une forme visuelle épurée permet aux enfants autistes de catégoriser avec succès une IS. Il nous semble que ce potentiel devrait être exploité pour tenter de solliciter plus systématiquement ce mécanisme miroir qui présente de précieuses qualités de plasticité tout au long des différentes étapes de la vie (Cross et al., 2006; Ertelt et al., 2007 ; Buccino et al., 2008).

L'attractivité de la perception visuelle interroge depuis des années les chercheurs qui travaillent sur l'autisme. Pour aider à accéder à la compréhension d'un contenu à travers le canal visuel, différentes pistes ont été étudiées. Ralentir les scènes en mouvement permet d'améliorer la reconnaissance d'expressions faciales (Tardif et al., 2007). Pour notre part, nous avons choisi de nous focaliser sur la cinématique corporelle.

Si notre étude comportementale permet de différencier les performances des enfants de développement typique et des enfants avec autisme dans la capacité à catégoriser des interactions sociales présentées sous la forme de points lumineux, l'évaluation comportementale pourrait être développée en tant qu'outil d'aide au diagnostic clinique. De plus, il apparaît que le MH présenté sous une forme épurée et abstraite suscite un intérêt chez des personnes avec autisme, et que sa reconnaissance sous la forme de sticks en est facilitée, des aspects rééducatifs pourraient aussi être développés. En effet, l'étude de Blake et collaborateurs (2003) a mis en évidence une corrélation entre un déficit de la perception du MH et le degré de sévérité de la pathologie soulignant l'intérêt de ce paradigme aussi bien pour le dépistage que pour la rééducation de cette pathologie.

CONCLUSION

En conclusion, ce travail de thèse apporte un faisceau d'arguments cohérents pour placer le mécanisme miroir comme un mécanisme fondateur dans la construction des représentations sociales de l'action chez l'enfant. Le couplage de la perception et de l'action, opérant dès la naissance sur la base d'une prédominance des informations visuelles, sert de base au développement harmonieux du mécanisme miroir. Ce couplage souligne aussi la première source d'interaction entre le nouveau-né et son environnement. En conjuguant adroitement résonance motrice et perception visuelle du mouvement humain dans un contexte d'interactions sociales, nous avons pu produire pour la première fois dans la littérature une preuve directe de l'activation du gyrus frontal inférieur, siège des neurones miroirs chez l'adulte ainsi que chez l'enfant à partir de huit ans lors de présentation de scènes sociales portées par le corps en action. Ainsi s'il existe une résonance motrice (Rizzolatti et al 1996), sensorielle (Keysers et al., 2004) et émotionnelle (Wicker et al., 2003), nos travaux expérimentaux nous autorisent à parler d'une résonance sociale.

Bien qu'en accord avec la littérature nous fassions l'hypothèse de l'atteinte du mécanisme miroir dans l'autisme, nos études comportementales indiquent néanmoins que la résonance motrice pourrait constituer un accès privilégié pour accéder aux interactions sociales chez l'enfant avec autisme, qu'il conviendrait probablement d'exploiter à visée diagnostique et rééducative.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abrahams BS, Geschwind DH. 2008. Advances in autism genetics: on the threshold of a new neurobiology. *Nature Reviews Genetics* 9:341-355.
- Adolphs R. 2009. The Social Brain: Neural Basis of Social Knowledge. *Annual Review of Psychology* 60:693-716.
- Adrian JE, Clemente RA, Villanueva L, Rieffe C. 2005. Parent-child picture-book reading, mothers' mental state language and children's theory of mind. *Journal of Child Language* 32:673-686.
- Adrien JL, 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 and Adolescent Psychiatry* 32:617-626.
- Ahlstrom V, Blake R, Ahlstrom U. 1997. Perception of biological motion. *Perception* 26:1539-1548.
- Alexander GE, Crutcher MD. 1990. Functional architecture of basal ganglia circuits: neural substrates of parallel processing. *Trends Neurosciences* 13:266-271.
- Allen G. 2006. Cerebellar contributions to autism spectrum disorders. *Clinical Neuroscience Research* 6:195-207.
- Allison T, Puce A, McCarthy G. 2000. Social perception from visual cues: role of the STS region. *Trends Cognitive Sciences*. 4:267-278.
- Amodio DM, Frith CD. 2006. Meeting of minds: the medial frontal cortex and social cognition. *Nature Review Neuroscience* 7:268-277.
- APA. 1994. *DSM-IV Manuel diagnostique et statistique des Troubles mentaux*. 4^{ème} éd
- Aristote. Traduit par P. Louis. Première édition 1973. *Marche des animaux- Mouvement des animaux*. Collection des universités de France Série grecque.
- Asendorpf JB, Baudonniere PM. 1993. Self-Awareness and Other-Awareness - Mirror Self-Recognition and Synchronic Imitation Among Unfamiliar Peers. *Developmental Psychology* 29:88-95.
- Asperger H. 1944. The "autistic psychopathy" in childhood. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten* 117:76-136.
- Assaiante, C. 2000. Construction du répertoire des référentiels posturaux : maturation et adaptation au cours de l'enfance. Habilitation à Diriger des Recherches en Neurosciences, Université de la Méditerranée, Marseille.
- Assaiante C, Woollacott M, Amblard B. 2000. Development of postural adjustment during gait initiation: Kinematic and EMG analysis. *Journal of Motor Behavior* 32:211-226.
- Assaiante, C., Mallau, S., Viel, S., Jover, M. Schmitz, C. 2005. Development of postural control during childhood. *Neural Plasticity*, Volume 12, N° 1-2, 33-42.
- Astafiev SV, Stanley CM, Shulman GL, Corbetta M. 2004. Extrastriate body area in human occipital cortex responds to the performance of motor actions. *Nature Neuroscience*. 7:542-548.
- Atkinson AP, Dittrich WH, Gemmell AJ, Young AW. 2004. Emotion perception from dynamic and static body expressions in point-light and full-light displays. *Perception* 33:717-746.
- Aylward EH, Minshew NJ, Field K, Sparks BF, Singh N. 2002. Effects of age on brain volume and head circumference in autism. *Neurology* 59:175-183.

- Bailey A, Lecouteur 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* 25:63-77.
- Bailey A, Luthert P, Dean A, Harding B, Janota I, Montgomery M, Rutter M, Lantos P. 1998. A clinicopathological study of autism. *Brain* 121:889-905.
- Barbu-Roth M, Anderson DI, Despres A, Provasi J, Cabrol D, Campos JJ. 2009. Neonatal Stepping in Relation to Terrestrial Optic Flow. *Child Development* 80:8-14.
- Barnea-Goraly N, Kwon H, Menon V, Eliez S, Lotspeich L, Reiss AL. 2004. White matter structure in autism: Preliminary evidence from diffusion tensor imaging. *Biological Psychiatry* 55:323-326.
- Baron-Cohen S. 1991. The Development of A Theory of Mind in Autism - Deviance and Delay. *Psychiatric Clinics of North America* 14:33-51.
- Baron-Cohen S. 2002. The extreme male brain theory of autism. *Trends in Cognitive Sciences* 6:248-254.
- Baron-Cohen S. 2004. The cognitive neuroscience of autism. *Journal of Neurology Neurosurgery and Psychiatry* 75:945-948.
- Baron-Cohen S. 2006. Two new theories of autism: hyper-systemising and assortative mating. *Archives of Disease in Childhood* 91:2-5.
- Baron-Cohen S, Ring H, Moriarty J, Schmitz B, Costa D, Ell P. 1994. Recognition of Mental State Terms - Clinical Findings in Children with Autism and A Functional Neuroimaging Study of Normal Adults. *British Journal of Psychiatry* 165:640-649.
- Baron-Cohen S, Leslie AM, Frith U. 1985. Does the autistic child have a "theory of mind"? *Cognition* 21:37-46.
- Barracough NE, Xiao DK, Baker CI, Oram MW, Perrett DI. 2005. Integration of visual and auditory information by superior temporal sulcus neurons responsive to the sight of actions. *Journal of Cognitive Neuroscience* 17:377-391.
- Bartsch K, Wellman H. 1989. Young Childrens Attribution of Action to Beliefs and Desires. *Child Development* 60:946-964.
- Behne T, Carpenter M, Tomasello M. 2005. One-year-olds comprehend the communicative intentions behind gestures in a hiding game. *Developmental Science* 8:492-499.
- Beintema JA, Lappe M. 16-4-2002. Perception of biological motion without local image motion. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 99:5661-5663.
- Beintema JA, Oleksiak A, van Wezel RJ. 2006. The influence of biological motion perception on structure-from-motion interpretations at different speeds. *Journal of Vision*. 6:712-726.
- Ben Bashat D, Kronfeld-Duenias V, Zachor DA, Ekstein PM, Hendler T, Tarrasch R, Even A, Levy Y, Ben Sira L. 2007. Accelerated maturation of white matter in young children with autism: A high b value DWI study. *NeuroImage* 37:40-47.
- Bertenthal BI, Bai DL. 1987. Infants Postural Compensations Induced by Central Versus Peripheral Optical-Flow. *Bulletin of the Psychonomic Society* 25:344-344.
- Bertenthal BI, Proffitt DR, Kramer SJ. 1987. Perception of biomechanical motions by infants: implementation of various processing constraints.

- Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance. 13:577-585.
- Bertone A, Mottron L, Jelenic P, Faubert J. 2003. Motion perception in autism: a "complex" issue. *Journal of Cognitive Neuroscience* 15:218-225.
- Bidet-Caulet A, Voisin J, Bertrand O, Fonlupt P. 2005. Listening to a walking human activates the temporal biological motion area. *NeuroImage* 28:132-139.
- Binkofski F, Buccino G. 2004. Motor functions of the Broca's region. *Brain Language* 89:362-369.
- Blake R, Shiffrar M. 2007. Perception of human motion. *Annual Review of Psychology*. 58:47-73.
- Blake R, Turner LM, Smoski MJ, Pozdol SL, Stone WL. 2003. Visual recognition of biological motion is impaired in children with autism. *Psychological Science* 14:151-157.
- Blakemore SJ, Boyer P, Pachot-Clouard M, Meltzoff A, Segebarth C, Decety J. 2003. The detection of contingency and animacy from simple animations in the human brain. *Cerebral Cortex* 13:837-844.
- Blakemore SJ, Decety J. 2001. From the perception of action to the understanding of intention. *Nature Review Neuroscience* 2:561-567.
- Blakemore SJ, den Ouden H, Choudhury S, Frith C. 2007. Adolescent development of the neural circuitry for thinking about intentions. *Social Cognitive and Affective Neuroscience* 2:130-139.
- Blanke O, Mohr C, Michel CM, Pascual-Leone A, Brugger P, Seeck M, Landis T, Thut G. 2005. Linking Out-of-Body Experience and Self Processing to Mental Own-Body Imagery at the Temporoparietal Junction. *Journal of Neuroscience*. 25:550-557.
- Bleuler EP. 1930. The physiogenic and psychogenic in schizophrenia. *American Journal of Psychiatry* 87:203-211.
- Boddaert N, Chabane N, Gervais H, Good CD, Bourgeois M, Plumet MH, Barthelemy C, Mouren MC, Artiges E, Samson Y, Brunelle F, Frackowiak RS, Zilbovicius M. 2004. Superior temporal sulcus anatomical abnormalities in childhood autism: a voxel-based morphometry MRI study. *NeuroImage*. 23:364-369.
- Bonda E, Petrides M, Ostry D, Evans A. 1996. Specific involvement of human parietal systems and the amygdala in the perception of biological motion. *Journal of Neuroscience*. 16:3737-3744.
- Booth AE, Pinto J, Bertenthal BI. 2002. Perception of the symmetrical patterning of human gait by infants. *Developmental Psychology* 38:554-563.
- Booth R, Charlton R, Hughes C, Happe F. 2003. Disentangling weak coherence and executive dysfunction: planning drawing in autism and attention-deficit/hyperactivity disorder. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences* 358:387-392.
- Bosbach S, Knoblich G, Reed CL, Cole J, Prinz W. 2006. Body inversion effect without body sense: Insights from deafferentation. *Neuropsychologia* 44:2950-2958.
- Brass M, Schmitt RM, Spengler S, Gergely Gr. 2007. Investigating Action Understanding: Inferential Processes versus Action Simulation. *Current Biology* 17:2117-2121.
- Brothers L. 1990. The social brain: a project for integrating primate behavior and neurophysiology in a new domain. *Concepts Neurosciences* 1:27-51.

- Broyd SJ, Demanuele C, Debener S, Helps SK, James CJ, Sonuga-Barke EJS. 2009. Default-mode brain dysfunction in mental disorders: A systematic review. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 33.
- Brunet E, Sarfati Y, Hardy-Bayle MC, Decety J. 2000. A PET investigation of the attribution of intentions with a nonverbal task. *NeuroImage* 11:157-166.
- Buccino G, Binkofski F, Fink GR, Fadiga L, Fogassi L, Gallese V, Seitz RJ, Zilles K, Rizzolatti G, Freund HJ. 2001. Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: an fMRI study. *European Journal of Neurosciences*. 13:400-404.
- Buccino G, Gatti R, Calzetti S, Giusti MC, Negrotti A, Riboldi E, Alfano S, Cappa S. 2008. Action observation treatment in the rehabilitation of patients with Parkinson's disease. *European Journal of Neurology* 15:18-18.
- Buccino G, Lui F, Canessa N, Patteri I, Lagravinese G, Benuzzi F, Porro CA, Rizzolatti G. 2004. Neural circuits involved in the recognition of actions performed by nonconspecifics: an FMRI study. *Journal of Cognitive Neuroscience*. 16:114-126.
- Call J, Tomasello M. 2008. Does the chimpanzee have a theory of mind? 30 years later. *Trends in Cognitive Sciences* 12:187-192.
- Callaghan T, Rochat P, Lillard A, Claux ML, Odden H, Itakura S, Tapanya S, Singh S. 2005. Synchrony in the onset of mental-state reasoning - Evidence from five cultures. *Psychological Science* 16:378-384.
- Calvo-Merino B, Glaser DE, Grezes J, Passingham RE, Haggard P. 2005. Action Observation and Acquired Motor Skills: An fMRI Study with Expert Dancers. *Cerebral Cortex* 15:1243-1249.
- Calvo-Merino B, Grezes J, Glaser DE, Passingham RE, Haggard P. 2006. Seeing or doing? Influence of visual and motor familiarity in action observation. *Current Biology*. 16:1905-1910.
- Carmichael G. 2004. Left temporoparietal junction performs social reasoning. *Lancet Neurology*. 3:328.
- Carper RA, Moses P, Tigue ZD, Courchesne E. 2002. Cerebral lobes in autism: Early hyperplasia and abnormal age effects. *NeuroImage* 16:1038-1051.
- Casanova MF, van Kooten IAJ, Switala AE, van Engeland H, Heinsen H, Steinbusch HWM, Hof PR, Trippe J, Stone J, Schmitz C. 2006. Minicolumnar abnormalities in autism. *Acta Neuropathologica* 112:287-303.
- Casey BJ, Galvan A, Hare TA. 2005. Changes in cerebral functional organization during cognitive development. *Current Opinion in Neurobiology* 15:239-244.
- Casile A, Giese MA. 2006. Nonvisual Motor Training Influences Biological Motion Perception. *Current Biology* 16:69-74.
- Castelli F, Frith C, Happe F, Frith U. 2002. Autism, Asperger syndrome and brain mechanisms for the attribution of mental states to animated shapes. *Brain* 125:1839-1849.
- Castelli F, Happe F, Frith U, Frith C. 2000. Movement and mind: a functional imaging study of perception and interpretation of complex intentional movement patterns. *NeuroImage*. 12:314-325.
- Cavanna AE, Trimble MR. 2006. The precuneus: a review of its functional anatomy and behavioural correlates. *Brain* 129:564-583.
- Caviness VS, Jr., Kennedy DN, Richelme C, Rademacher J, Filipek PA. 1996. The human brain age 7-11 years: a volumetric analysis based on magnetic resonance images. *Cerebral Cortex* 6:726-736.

- Caviness VS, Rakic P. 1978. Mechanisms of Cortical Development - View from Mutations in Mice. *Annual Review of Neuroscience* 1:297-326.
- Chouchourelou A, Matsuka T, Harber K, Shiffrar M. 2006. The visual analysis of emotional actions. *Social Neuroscience* 1:63-74.
- Choudhury S, Charman T, Bird V, Blakemore SJ. 2007. Development of action representation during adolescence. *Neuropsychologia* 45:255-262.
- Ciaramidaro A, Adenzato M, Enrici I, Erk S, Pia L, Bara BG, Walter H. 2007. The intentional network: How the brain reads varieties of intentions. *Neuropsychologia* 45:3105-3113.
- Clarke TJ, Bradshaw MF, Field DT, Hampson SE, Rose D. 2005. The perception of emotion from body movement in point-light displays of interpersonal dialogue. *Perception* 34:1171-1180.
- Cochin S, Barthelemy C, Martineau L. 1998. Changes in quantified EEG with observation and execution of movements. *European Journal of Neuroscience* 10: 254.
- Cochin S, Barthelemy C, Roux S, Martineau J. 1999. Observation and execution of movement: similarities demonstrated by quantified electroencephalography. *European Journal of Neuroscience* 11:1839-1842.
- Cochin S, Barthelemy C, Roux S, Martineau J. 2001. Electroencephalographic activity during perception of motion in childhood. *European Journal of Neuroscience* 13:1791-1796.
- Corbetta M, Shulman GL. 2002. Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature Review Neuroscience* 3:201-215.
- Courchesne E. 1997. Brainstem, cerebellar and limbic neuroanatomical abnormalities in autism. *Current Opinion in Neurobiology* 7:269-278.
- Courchesne E, Karns CM, Davis HR, Ziccardi R, Carper RA, Tigue ZD, Chisum HJ, Moses P, Pierce K, Lord C, Lincoln AJ, Pizzo S, Schreibman L, Haas RH, Akshoomoff NA, Courchesne RY. 2001. Unusual brain growth patterns in early life in patients with autistic disorder: an MRI study. *Neurology* 57:245-254.
- Courchesne E, Pierce K. 2005. Why the frontal cortex in autism might be talking only to itself: local over-connectivity but long-distance disconnection. *Current Opinion in Neurobiology* 15:225-230.
- Courchesne E, Pierce K, Schumann CM, Redcay E, Buckwalter JA, Kennedy DP, Morgan J. 2007. Mapping early brain development in autism. *Neuron* 56:399-413.
- Cross ES, Hamilton AF, Grafton ST. 2006. Building a motor simulation de novo: observation of dance by dancers. *NeuroImage*. 31:1257-1267.
- Cutting JE. 1978. Generation of Synthetic Male and Female Walkers Through Manipulation of A Biomechanical Invariant. *Perception* 7:393-405.
- Cutting JE, Kozlowski LT. 1977. Recognizing friends by their walk: Gait perception without familiarity cues. *Bulletin of Psychonomic Society* 9:353-356.
- Cutting JE, Proffitt DR, Kozlowski LT. 1978. A biomechanical invariant for gait perception. *Journal of Experimental of Psychology : Human Perception and Performance*. 4:357-372.
- D'Entremont B, Yazhek A. 2007. Imitation of intentional and accidental actions by children with autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders* 37:1665-1678.

- Dakin S, Frith U. 2005. Vagaries of visual perception in autism. *Neuron* 48:497-507.
- Damasio AR, Maurer RG. 1978. Neurological Model for Childhood Autism. *Archives of Neurology* 35:777-786.
- Damasio H, Grabowski T, Frank R, Galaburda AM, Damasio AR. 1994. The Return of Gage, Phineas - Clues About the Brain from the Skull of A Famous Patient. *Science* 264:1102-1105.
- Danis A, Santolini A, Tijus C. 1998a. Les imitations précoces. *Enfants, adolescents : Approches psychologiques. Les âges de la vie. Breal.* p. 43-46.
- Danis A, Santolini A, Tijus C. 1998b. Les relations entre bébés. *Enfants, adolescents : Approches psychologiques. Les âges de la vie. Breal.* p. 69-72.
- de Lange FP, Spronk M, Willems RM, Toni I, Bekkering H. 2008. Complementary Systems for Understanding Action Intentions. *Current Biology* 18:454-457.
- de Villiers J. 2007. The interface of language and Theory of Mind. *Lingua* 117:1858-1878.
- Decety J, Grezes J. 2006. The power of simulation: imagining one's own and other's behavior. *Brain Research* 1079:4-14.
- Decety J, Meyer M. 2008. From emotion resonance to empathic understanding: A social developmental neuroscience account. *Development and Psychopathology* 20:1053-1080.
- Decety J, Grezes J. 1999. Neural mechanisms subserving the perception of human actions. *Trends in Cognitive Sciences* 3:172-178.
- Decety J, Michalska KJ, Akitsuki Y. 2008. Who caused the pain? An fMRI investigation of empathy and intentionality in children. *Neuropsychologia* 46:2607-2614.
- Deth R, Muratore C, Benzecry J, Power-Charnitsky VA, Waly M. 2008. How environmental and genetic factors combine to cause autism: A redox/methylation hypothesis. *Neurotoxicology* 29:190-201.
- di Pellegrino G, Fadiga L, Fogassi L, Gallese V, Rizzolatti G. 1992. Understanding motor events: a neurophysiological study. *Experimental Brain Research* 91:176-180.
- Dittrich W, Lea S, Barrett J, Gurr P. 1998. Categorization Of Natural Movements By Pigeons: Visual Concept Discrimination And Biological Motion. *Journal of Experimental Analysis of Behavior.* 70:281-299.
- Dittrich WH. 1993. Action categories and the perception of biological motion. *Perception* 22:15-22.
- Dittrich WH, Troscianko T, Lea S, Morgan D. 1996. Perception of emotion from dynamic point-light displays represented in dance. *Perception* 25:727-738.
- Downing PE, Jiang Y, Shuman M, Kanwisher N. 2001. A cortical area selective for visual processing of the human body. *Science* 293:2470-2473.
- Durand CM, Betancur C, Boeckers TM, Bockmann J, Chaste P, Fauchereau F, Nygren G, Rastam M, Gillberg IC, Anckarsater H, Sponheim E, Goubran-Botros H, Delorme R, Chabane N, Mouren-Simeoni MC, de Mas P, Bieth E, Roge B, Heron D, Burglen L, Gillberg C, Leboyer M, Bourgeron T. 2007. Mutations in the gene encoding the synaptic scaffolding protein SHANK3 are associated with autism spectrum disorders. *Nature Genetics* 39:25-27.
- Duvernoy HM. 1999. The Human brain, surface, three-dimensional sectional anatomy with MRI, and blood supply. 2nd, completely rev. and enlarged ed., VII.

- Eisenmajer R, Prior M, Leekam S, Wing L, Gould J, Welham M, Ong B. 1996. Comparison of clinical symptoms in autism and Asperger's disorder. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry* 35:1523-1531.
- Ertelt D, Small S, Solodkin A, Dettmers C, McNamara A, Binkofski F, Buccino G. 2007. Action observation has a positive impact on rehabilitation of motor deficits after stroke. *NeuroImage* 36:T164-T173.
- Espósito G, Venuti P. 2008. Analysis of toddlers' gait after six months of independent walking to identify autism: A preliminary study. *Perceptual and Motor Skills* 106:259-269.
- Fabbri-Destro M, Cattaneo L, Boria S, Rizzolatti G. 2009. Planning actions in autism. *Experimental Brain Research* 192:521-525.
- Falck-Ytter T, Gredeback G, von Hofsten C. 2006. Infants predict other people's action goals. *Nature Neuroscience* 9:878-879.
- Fatemi SH, Snow AV, Stary JM, Araghi-Niknam M, Reutiman TJ, Lee S, Brooks AI, Pearce DA. 2005. Reelin signaling is impaired in autism. *Biology Psychiatry* 57:777-787.
- Fecteau S, Lepage JF, Theoret H. 2006. Autism spectrum disorder: Seeing is not understanding. *Current Biology* 16:R131-R133.
- Felleman DJ, Van Essen DC. 1991. Distributed Hierarchical Processing in the Primate Cerebral Cortex 1:1-47.
- Ferrari PF, Gallese V, Rizzolatti G, Fogassi L. 2003. Mirror neurons responding to the observation of ingestive and communicative mouth actions in the monkey ventral premotor cortex. *European Journal of Neuroscience* 17:1703-1714.
- Fienberg S. 1981. The Analysis of Cross-classified Data. In: Massachusetts Institute of Technology, editor.
- Fink GR, Halligan PW, Marshall JC, Frith CD, Frackowiak RSJ, Dolan RJ. 1997. Neural mechanisms involved in the processing of global and local aspects of hierarchically organized visual stimuli. *Brain* 120:1779-1791.
- Fletcher PC, Happe F, Frith U, Baker SC, Dolan RJ, Frackowiak RSJ, Frith CD. 1995. Other Minds in the Brain - A Functional Imaging Study of Theory of Mind in Story Comprehension. *Cognition* 57:109-128.
- Folstein S, Rutter M. 1977. Genetic Influences and Infantile-Autism. *Nature* 265:726-728.
- Fombonne E. 2003. Epidemiological surveys of autism and other pervasive developmental disorders: An update. *Journal of Autism and Developmental Disorders* 33:365-382.
- Forsberg H, Eliasson AC, Kinoshita H, Johansson RS, Westling G. 1991. Development of Human Precision Grip-I - Basic Coordination of Force. *Experimental Brain Research* 85:451-457.
- Fox MD, Snyder AZ, Vincent JL, Corbetta M, Van Essen DC, Raichle ME. 2005. The human brain is intrinsically organized into dynamic, anticorrelated functional networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 102:9673-9678.
- Fox R, McDaniel C. 1982. The perception of biological motion by human infants. *Science* 218:486-487.
- Fransson P. 2006. How default is the default mode of brain function? Further evidence from intrinsic BOLD signal fluctuations. *Neuropsychologia* 44:2836-2845.

- Freitag CM, Konrad C, Haberlen M, Kleser C, von Gontard A, Reith W, Troje NF, Krick C. 2008. Perception of biological motion in autism spectrum disorders. *Neuropsychologia* 46:1480-1494.
- Friston KJ, Glaser DE, Henson RNA, Kiebel S, Phillips C, Ashburner J. 2002. Classical and Bayesian inference in neuroimaging: Applications. *NeuroImage* 16:484-512.
- Friston KJ, Price CJ, Fletcher P, Moore C, Frackowiak RSJ, Dolan RJ. 1996. The Trouble with Cognitive Subtraction. *NeuroImage* 4:97-104.
- Friston KJ, Penny W, David O. 2005. Modeling Brain Responses. In: Michael FG, editor. *International Review of Neurobiology. Neuroimaging, Part A*. Academic Press. p. 89-124.
- Frith CD. 2007. The social brain? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 362:671-678.
- Frith CD, Frith U. 1999. Interacting minds-a biological basis. *Science* 286:1692-1695.
- Frith U. 2004. Emanuel Miller lecture: Confusions and controversies about Asperger Syndrome. *Journal of Child Psychology and Psychiatry* 45:672-686.
- Frith U, Frith CD. 2003. Development and neurophysiology of mentalizing. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences* 358:459-473.
- Frith U, Happe F. 1994. Autism - Beyond Theory of Mind. *Cognition* 50:115-132.
- Gaillard WD, Grandin CB, Xu B. 2001. Developmental aspects of pediatric fMRI: considerations for image acquisition, analysis, and interpretation. *NeuroImage* 13:239-249.
- Gallagher HL, Frith CD. 2003. Functional imaging of 'theory of mind'. *Trends Cognitive Sciences*. 7:77-83.
- Gallagher HL, Happe F, Brunswick N, Fletcher PC, Frith U, Frith CD. 2000. Reading the mind in cartoons and stories: an fMRI study of 'theory of mind' in verbal and nonverbal tasks. *Neuropsychologia* 38:11-21.
- Gallese V. 2006. Intentional attunement: A neurophysiological perspective on social cognition and its disruption in autism. *Brain Research* 1079:15-24.
- Gallese V, Fadiga L, Fogassi L, Rizzolatti G. 1996. Action recognition in the premotor cortex. *Brain* 119 (Pt 2):593-609.
- Gallese V, Goldman A. 1998. Mirror neurons and the simulation theory of mind-reading. *Trends in Cognitive Sciences* 2:493-501.
- Gepner B. 2001. What role is played by troubles of movement vision in infantile autism? A new neuropathological, developmental approach. *Psychiatrie de l'Enfant* 44:77-126.
- Gepner B, Mestre D, Masson G, Deschonen S. 1995. Postural Effects of Motion Vision in Young Autistic-Children. *Neuroreport* 6:1211-1214.
- Gepner B, Mestre DR. 2002. Brief report: Postural reactivity to fast visual motion differentiates autistic from children with asperger syndrome. *Journal of Autism and Developmental Disorders* 32:231-238.
- Gergely G, Bekkering H, Kiraly I. 2002. Rational imitation in preverbal infants. *Nature* 415:755-755.
- Geschwind DH, Levitt P. 2007. Autism spectrum disorders: developmental disconnection syndromes. *Current Opinion in Neurobiology* 17:103-111.

- Geurts HM, Corbett B, Solomon M. 2009. The paradox of cognitive flexibility in autism. *Trends in Cognitive Sciences* 13:74-82.
- Geurts HM, Verté S, Oosterlaan J, Roeyers H, Sergeant JA. 2004. How specific are executive functioning deficits in attention deficit hyperactivity disorder and autism? *Journal of Child Psychology and Psychiatry* 45:836-854.
- Giese MA, Poggio T. 2003. Neural mechanisms for the recognition of biological movements. *Nature Review Neurosciences* 4:179-192.
- Giese MA, Thornton I, Edelman S. 2008. Metrics of the perception of body movement. *Journal of Vision*. 8:1-18.
- Gilbert SJ, Bird G, Brindley R, Frith CD, Burgess PW. 2008. Atypical recruitment of medial prefrontal cortex in autism spectrum disorders: An fMRI study of two executive function tasks. *Neuropsychologia* 46:2281-2291.
- Gillberg C. 1998. Asperger syndrome and high-functioning autism. *British Journal of Psychiatry* 172:200-209.
- Gliga T, Dehaene-Lambertz G. 2005. Structural encoding of body and face in human infants and adults. *Journal of Cognitive Neuroscience* 17:1328-1340.
- Goldman AI. 1993. The Psychology of Folk Psychology. *Behavioral and Brain Sciences* 16:15-28.
- Goodale MA, Milner AD. 1992. Separate visual pathways for perception and action. *Trends Neuroscience* 15:20-25.
- Gordon RM. 1986. Folk Psychology as Simulation. *Mind and Language* 1:158-171.
- Goubet N, Rochat P, Maire-Leblond C, Poss S. 2006. Learning from others in 9-18-month-old infants. *Infant and Child Development* 15:161-177.
- Gousse V, Plumet MH, Chabane N, Mouren-Simeoni MC, Ferradian N, Leboyer M. 2002. Fringe phenotypes in autism: a review of clinical, biochemical and cognitive studies. *European Psychiatry* 17:120-128.
- Grandin T. 1999. *Ma vie d'autiste*. Edition Odile Jacob.
- Grether JK. 2006. Epidemiology of autism: Current controversies and research directions. *Clinical Neuroscience Research* 6:119-126.
- Grezes J, Costes N, Decety J. 1998. Top down effect of the strategy on the perception of human biological motion: a PET investigation. *Cognitive Neuropsychology* 15:553-582.
- Grezes J, Fonlupt P, Bertenthal B, Delon-Martin C, Segebarth C, Decety J. 2001. Does perception of biological motion rely on specific brain regions? *NeuroImage*. 13:775-785.
- Grossman E, Blake R. 2001. Brain activity evoked by inverted and imagined biological motion. *Vision Research*. 41:1475-1482.
- Grossman E, Donnelly M, Price R, Pickens D, Morgan V, Neighbor G, Blake R. 2000. Brain areas involved in perception of biological motion. *Journal of Cognitive Neuroscience*. 12:711-720.
- Grossman ED, Blake R. 2002. Brain Areas Active during Visual Perception of Biological Motion. *Neuron* 35:1167-1175.
- Grossman ED, Battelli L, Pascual-Leone A. 2005. Repetitive TMS over posterior STS disrupts perception of biological motion. *Vision Research* 45:2847-2853.

- Gusnard DA, Raichle ME. 2001. Searching for a baseline: Functional imaging and the resting human brain. *Nature Reviews Neuroscience* 2:685-694.
- Hadjikhani N, Joseph RM, Snyder J, Tager-Flusberg H. 2006. Anatomical differences in the mirror neuron system and social cognition network in autism. *Cerebral Cortex* 16:1276-1282.
- Hamilton A, Grafton ST. 2006. Goal representation in human anterior intraparietal sulcus. *Journal of Neurosciences* 26:1133-1137.
- Happe F, Ronald A. 2008. The 'Fractionable Autism Triad': A Review of Evidence from Behavioural, Genetic, Cognitive and Neural Research. *Neuropsychology Review* 18:287-304.
- Happe FGE. 1997. Central coherence and theory of mind in autism: Reading homographs in context. *British Journal of Developmental Psychology* 15:1-12.
- Happe FGE, Booth RDL. 2008. The power of the positive: Revisiting weak coherence in autism spectrum disorders. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 61:50-63.
- Happe F, Frith U. 1996. The neuropsychology of autism. *Brain* 119:1377-1400.
- Hari R, Forss N, Avikainen S, Kirveskari E, Salenius S, Rizzolatti G. 1998. Activation of human primary motor cortex during action observation: A neuromagnetic study. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 95:15061-15065.
- Hazlett HC, Poe M, Gerig G, Smith RG, Provenzale J, Ross A, Gilmore J, Piven J. 2005. Magnetic resonance imaging and head circumference study of brain size in autism: birth through age 2 years. *Archives of General Psychiatry* 62:1366-1376.
- Herbert MR, Ziegler DA, Makris N, Filipek PA, Kemper TL, Normandin JJ, Sanders HA, Kennedy DN, Caviness VS, Jr. 2004. Localization of white matter volume increase in autism and developmental language disorder. *Annual Neurology* 55:530-540.
- Hernandez N, Metzger A, Magne R, Bonnet-Brilhaut F, Roux S, Barthelemy C, Martineau J. 2009. Exploration of core features of a human face by healthy and autistic adults analyzed by visual scanning. *Neuropsychologia* 47:1004-1012.
- Hill EL. 2004. Executive dysfunction in autism. *Trends in Cognitive Sciences* 8:26-32.
- Hill EL, Bird CA. 2006. Executive processes in Asperger syndrome: Patterns of performance in a multiple case series. *Neuropsychologia* 44:2822-2835.
- Hirai M, Hiraki K. 2005. An event-related potentials study of biological motion perception in human infants. *Cognitive Brain Research* 22:301-304.
- Hiris E, Humphrey D, Stout A. 2005. Temporal properties in masking biological motion. *Perception and Psychophysics*. 67:435-443.
- Hodgins JK, O'Brien JF, Tumblin J. 1998. Perception of human motion with different geometric models. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 4 : 4 : 307-316.
- Hoehl S, Reid V, Mooney J, Striano T. 2008. What are you looking at? Infants' neural processing of an adult's object-directed eye gaze. *Developmental Science* 11:10-16.
- Houde O, Guichart E. 2000. Inhibition and children's numerical capacities: Evidence of Piaget's misinterpretation. *International Journal of Psychology* 35:153-153.

- Hubert B, Wicker B, Moore DG, Monfardini E, Duverger H, Da Fonseca D, Deruelle C. 2007. Brief report: recognition of emotional and non-emotional biological motion in individuals with autistic spectrum disorders. *Journal of Autism Developmental Disorders*. 37:1386-1392.
- Humphrey T. 1970. The development of human fetal activity and its relation to postnatal behavior. *Advances in Child Development and Behavior* : 5 : 1-57.
- Hunt AR, Halper F. 2008. Disorganizing biological motion. *Journal of Vision*. 8:12-15.
- Husain M, Nachev P. 2007. Space and the parietal cortex. *Trends in Cognitive Sciences* 11:30-36.
- Iacoboni M, Lieberman MD, Knowlton BJ, Molnar-Szakacs I, Moritz M, Throop CJ, Fiske AP. 2004. Watching social interactions produces dorsomedial prefrontal and medial parietal BOLD fMRI signal increases compared to a resting baseline. *NeuroImage*. 21:1167-1173.
- Iacoboni M, Molnar-Szakacs I, Gallese V, Buccino G, Mazziotta JC, Rizzolatti G. 2005. Grasping the intentions of others with one's own mirror neuron system. *PLoS.Biology*. 3: 3 : 529-535.
- Jacob P, Jeannerod M. 2005. The motor theory of social cognition: a critique. *Trends Cognitive Sciences* 9:21-25.
- Jacobs A, Pinto J, Shiffrar M. 2004. Experience, context, and the visual perception of human movement. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 30:822-835.
- Jamain S, Quach H, Betancur C, Rastam M, Colineaux C, Gillberg IC, Soderstrom H, Giros B, Leboyer M, Gillberg C, Bourgeron T. 2003. Mutations of the X-linked genes encoding neuroligins NLGN3 and NLGN4 are associated with autism. *Nature Genetics*. 34:27-29.
- James SJ, Melnyk S, Jernigan S, Cleves MA, Halsted CH, Wong DH, Cutler P, Bock K, Boris M, Bradstreet JJ, Baker SM, Gaylor DW. 2006. Metabolic endophenotype and related genotypes are associated with oxidative stress in children with autism. *American Journal of Medical Genetics Part B-Neuropsychiatric Genetics* 141B:947-956.
- Jarvinen-Pasley A, Wallace GL, Ramus F, Happe F, Heaton P. 2008. Enhanced perceptual processing of speech in autism. *Developmental Science* 11:109-121.
- Jeannerod M, Decety J. 1995. Mental motor imagery: A window into the representational stages of action. *Current Opinion in Neurobiology* 5:727-732.
- Jeannerod M. 2001. Neural Simulation of Action: A Unifying Mechanism for Motor Cognition. *NeuroImage* 14:S103-S109.
- Jellema T, Baker CI, Wicker B, Perrett DI. 2000. Neural representation for the perception of the intentionality of actions. *Brain and Cognition* 44:280-302.
- Jellema T, Perrett DI. 2003. Cells in monkey STS responsive to articulated body motions and consequent static posture: a case of implied motion? *Neuropsychologia* 41:1728-1737.
- Jemel B, Mottron L, Dawson M. 2006. Impaired face processing in autism: Fact or artifact? *Journal of Autism and Developmental Disorders* 36:91-106.
- Johansson G. 1973. Visual perception of biological motion and a model for its analysis. *Perception and Psychophysics*. 14:201-211.
- Johnson MH. 2006. Biological motion: A perceptual life detector? *Current Biology* 16:R376-R377.

- Jokisch D, Troje NF. 2003. Biological motion as a cue for the perception of size. *Journal of Vision*. 3:252-264.
- Jouen F. 1986. The Contribution of Visual and Vestibular Information in the Infants Detection of His Own Movement. *Année Psychologique* 86:169-182.
- Jouen F, Lepecq JC, Gapenne O, Bertenthal BI. 2000. Optic flow sensitivity in neonates. *Infant Behavior and Development* 23:271-284.
- Just MA, Cherkassky VL, Keller TA, Kana RK, Minshew NJ. 2007. Functional and anatomical cortical underconnectivity in autism: Evidence from an fMRI study of an executive function task and corpus callosum morphometry. *Cerebral Cortex* 17:951-961.
- Kable JW, Chatterjee A. 2006. Specificity of action representations in the lateral occipitotemporal cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience* 18:1498-1517.
- Kaminski J, Call J, Tomasello M. 2008. Chimpanzees know what others know, but not what they believe. *Cognition* 109:224-234.
- Kana RK, Keller TA, Minshew NJ, Just MA. 2007. Inhibitory control in high-functioning autism: Decreased activation and underconnectivity in inhibition networks. *Biological Psychiatry* 62:198-206.
- Kang HC, Burgund ED, Lugar HM, Petersen SE, Schlaggar BL. 2003. Comparison of functional activation foci in children and adults using a common stereotactic space. *NeuroImage* 19:16-28.
- Kanner L. 1943. Autistic disturbances of affective contact. *Nervous Child* 2:217-250.
- Kennedy DP, Courchesne E. 2008. The intrinsic functional organization of the brain is altered in autism. *NeuroImage* 39:1877-1885.
- Kenworthy L, Yerys BE, Anthony LG, Wallace GL. 2008. Understanding Executive Control in Autism Spectrum Disorders in the Lab and in the Real World. *Neuropsychology Review* 18:320-338.
- Keysers C, Wicker B, Gazzola V, Anton JL, Fogassi L, Gallese V. 2004. A touching sight: SII/PV activation during the observation and experience of touch. *Neuron* 42:335-346.
- Kim J, Doop ML, Blake R, Park S. 2005. Impaired visual recognition of biological motion in schizophrenia. *Schizophrenia Research* 77:299-307.
- Klaver P, Lichtensteiger J, Bucher K, Dietrich T, Loenneker T, Martin E. 2008. Dorsal stream development in motion and structure-from-motion perception. *NeuroImage*. 39:1815-1823.
- Klin A, Jones W. 2008. Altered face scanning and impaired recognition of biological motion in a 15-month-old infant with autism. *Development Sciences*. 11:40-46.
- 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* 59:809-816.
- Klingberg T, Vaidya CJ, Gabrieli JDE, Moseley ME, Hedehus M. 1999. Myelination and organization of the frontal white matter in children: a diffusion tensor MRI study. *Neuroreport* 10:2817-2821.
- Klinger E, Bouchard S, Legeron P, Roy S, Lauer F, Chemin I, Nugues P. 2005. Virtual reality therapy for social phobia: Its efficacy through a control study. *Cyberpsychology & Behavior* 8:332-333.
- Kobayashi C, Glover GH, Temple E. 2007. Children's and adults' neural bases of verbal and nonverbal 'theory of mind'. *Neuropsychologia* 45:1522-1532.

- Kohler E, Keysers C, Umiltà MA, Fogassi L, Gallese V, Rizzolatti G. 2002. Hearing sounds, understanding actions: Action representation in mirror neurons. *Science* 297:846-848.
- Kozlowski LT, Cutting JE. 1977. Recognizing the sex of a walker from a dynamic point-light display. *Perception and Psychophysics* 21:578-580.
- Kringelbach ML, Rolls ET. 2004. The functional neuroanatomy of the human orbitofrontal cortex: evidence from neuroimaging and neuropsychology. *Progress in Neurobiology*. 72:341-372.
- Krubholz K, Nobis EA, Weatheritt RJ, Fink GR. 2009. Executive Control of Spatial Attention Shifts in the Auditory Compared to the Visual Modality. *Human Brain Mapping* 30:1457-1469.
- Lacroix A, Guidetti M, Roge B, Reilly J. 2009. Recognition of emotional and nonemotional facial expressions: A comparison between Williams syndrome and autism. *Research in Developmental Disabilities* 30:976-985.
- Lamb JA, Parr JR, Baile AJ, Monaco AP. 2002. Autism - In search of susceptibility genes. *Neuromolecular Medicine* 2:11-28.
- Lamm C, Fischer MH, Decety J. 2007. Predicting the actions of others taps into one's own somatosensory representations-A functional MRI study. *Neuropsychologia* 45:2480-2491.
- Lawson J, Baron-Cohen S, Wheelwright S. 2004. Empathising and systemising in adults with and without Asperger Syndrome. *Journal of Autism and Developmental Disorders* 34:301-310.
- Layton D, Rochat P. 2007. Contribution of motion information to maternal face discrimination in infancy. *Infancy* 12:257-271.
- Lee JE, Bigler ED, Alexander AL, Lazar M, Dubray MB, Chung MK, Johnson M, Morgan J, Miller JN, McMahon WM, Lu J, Jeong EK, Lainhart JE. 2007. Diffusion tensor imaging of white matter in the superior temporal gyrus and temporal stem in autism. *Neuroscience Letters* 424:127-132.
- Lenroot RK, Giedd JN. 2006. Brain development in children and adolescents: Insights from anatomical magnetic resonance imaging. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 30:718-729.
- Lepage JF, Theoret H. 2006. EEG evidence for the presence of an action observation-execution matching system in children. *European Journal of Neuroscience* 23:2505-2510.
- Lepage JF, Theoret H. 2007. The mirror neuron system: grasping others' actions from birth? *Developmental Science* 10:513-523.
- Leslie AM. 1987. Pretense and Representation - the Origins of Theory of Mind. *Psychological Review* 94:412-426.
- Liebal K, Behne T, Carpenter M, Tomasello M. 2009. Infants use shared experience to interpret pointing gestures. *Developmental Science* 12:264-271.
- Logothetis NK. 2008. What we can do and what we cannot do with fMRI. *Nature* 453:869-878.
- London E. 2007. The role of the neurobiologist in redefining the diagnosis of autism. *Brain Pathology* 17:408-411.
- Lopez B, Leekam SR. 2007. Central coherence theory: A review of theoretical assumptions. *Infancia y Aprendizaje* 30:439-457.
- Lu HJ, Tjan BS, Liu ZL. 2006. Shape recognition alters sensitivity in stereoscopic depth discrimination. *Journal of Vision* 6:75-86.

- Mahler MS, Mcdevitt JB. 1982. Thoughts on the Emergence of the Sense of Self, with Particular Emphasis on the Body Self. *Journal of the American Psychoanalytic Association* 30:827-848.
- Maintenant C, Blaye A. 2008. The development of categorical flexibility in 3-to 8-year-old children : The role of conceptual aspects. *Année Psychologique* 108:659-698.
- Manjaly ZM, Bruning N, Neufang S, Stephan KE, Brieber S, Marshall JC, Kamp-Becker I, Remschmidt H, Herpertz-Dahlmann B, Konrad K, Fink GR. 2007. Neurophysiological correlates of relatively enhanced local visual search in autistic adolescents. *NeuroImage* 35:283-291.
- Martens MA, Wilson SJ, Reutens DC. 2008. Research Review: Williams syndrome: a critical review of the cognitive, behavioral, and neuroanatomical phenotype. *Journal of Child Psychology and Psychiatry* 49:576-608.
- Martineau J, Cochin S. 2003. Visual perception in children: human, animal and virtual movement activates different cortical areas. *International Journal of Psychophysiology* 51:37-44.
- Martineau J, Cochin S, Magne R, Barthelemy C. 2008. Impaired cortical activation in autistic children: Is the mirror neuron system involved? *International Journal of Psychophysiology* 68:35-40.
- Materna S, Dicke PW, Thier P. 2008. The posterior superior temporal sulcus is involved in social communication not specific for the eyes. *Neuropsychologia* 46:2759-2765.
- Mather G, Murdoch L. 1994. Gender Discrimination in Biological Motion Displays Based on Dynamic Cues. *Proceedings of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences* 258:273-279.
- Mather G, Radford K, West S. 1992. Low-Level Visual Processing of Biological Motion. *Proceedings of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences* 249:149-155.
- Meary D, Kitromilides E, Mazens K, Graff C, Gentaz E. 2007. Four-day-old human neonates look longer at non-biological motions of a single point-of-light. *Plos One* 2: 1 : 186.
- Meltzoff AN. 2007. The 'like me' framework for recognizing and becoming an intentional agent. *Acta Psychologica* 124:26-43.
- Meltzoff AN, Moore MK. 1977. Imitation of facial and manual gestures by human neonates. *Science* 198: 4312 : 75-78.
- Michels L, Lappe M, Vaina LM. 2005. Visual areas involved in the perception of human movement from dynamic form analysis. *Neuroreport* 16:1037-1041.
- 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* 43:255-263.
- Mishkin M, Ungerleider LG, Macko KA. 1983. Object vision and spatial vision: two cortical pathways. *Trends in Neurosciences* 6:414-417.
- Mitchell JP. 2008. Activity in right temporo-parietal junction is not selective for theory-of-mind. *Cerebral Cortex* 18:262-271.
- Mitchell JP, Macrae CN, Banaji MR. 2006. Dissociable medial prefrontal contributions to judgments of similar and dissimilar others. *Neuron* 50:655-663.
- Moessner R, Marshall CR, Sutcliffe JS, Skaug J, Pinto D, Vincent J, Zwaigenbaum L, Fernandez B, Roberts W, Szatmari P, Scherer SW. 2007. Contribution of

- SHANK3 mutations to autism spectrum disorder. *American Journal of Human Genetics* 81:1289-1297.
- Moore DG, Hobson R, Lee A. 1997. Components of person perception: An investigation with autistic, non-autistic retarded and typically developing children and adolescents. *British Journal of Developmental Psychology* 15:401-423.
- Moore DG, Goodwin JE, George R, Axelsson EL, Braddick FMB. 2007. Infants perceive human point-light displays as solid forms. *Cognition* 104:377-396.
- Moriguchi Y, Ohnishi T, Mori T, Matsuda H, Komaki G. 2007. Changes of brain activity in the neural substrates for theory of mind during childhood and adolescence. *Psychiatry and Clinical Neurosciences* 61:355-363.
- Mottron L, Burack JA, Iarocci G, Belleville S, Enns JT. 2003. Locally oriented perception with intact global processing among adolescents with high-functioning autism: evidence from multiple paradigms. *Journal of Child Psychology and Psychiatry and Allied Disciplines* 44:904-913.
- 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* 36:27-43.
- Moutier SV, Plagne-Cayeux S, Melot AM, Houde M. 2006. Syllogistic reasoning and belief-bias inhibition in school children: evidence from a negative priming paradigm. *Developmental Science* 9:166-172.
- Munson J, Dawson G, Abbott R, Faja S, Webb SJ, Friedman SD, Shaw D, Artru A, Dager SR. 2006. Amygdalar volume and behavioral development in autism. *Archives of General Psychiatry* 63:686-693.
- Murphy P, Brady N, Troje NF. 2008. Perception of biological motion in individuals with autism spectrum disorder. *Perception* 37:113-113.
- Muzik O, Chugani DC, Juhász C, Shen C, Chugani HT. 2000. Statistical Parametric Mapping: Assessment of Application in Children. *NeuroImage* 12:538-549.
- Nadel J, Baudonniere PM, Hersart H. 1985. Play-Setting with Vs Without Adult - Effect on the Interactions Between 2-3 Year-Old-Peers. *Cahiers de Psychologie Cognitive-Current Psychology of Cognition* 5:405-406.
- Nagy Z, Westerberg H, Klingberg T. 2004. Maturation of White Matter is Associated with the Development of Cognitive Functions during Childhood. *Journal of Cognitive Neuroscience* 16:1227-1233.
- Neisser U. 1991. 2 Perceptually Given Aspects of the Self and Their Development. *Developmental Review* 11:197-209.
- Neri P, Morrone MC, Burr DC. 1998. Seeing biological motion. *Nature* 395:894-896.
- Nishitani N, Avikainen S, Hari R. 2004. Abnormal imitation-related cortical activation sequences in Asperger's syndrome. *Annals of Neurology* 55:558-562.
- Nordahl CW, Dierker D, Mostafavi I, Schumann CM, Rivera SM, Amaral DG, Van Essen DC. 2007. Cortical folding abnormalities in autism revealed by surface-based morphometry. *Journal of Neurosciences*. 27:11725-11735.
- Nystrom P. 2008a. From motion to movements : Revelations by the infant EEG. Thèse.
- Nystrom P. 2008b. The infant mirror neuron system studied with high density EEG. *Social Neuroscience* 3:334-347.

- Oberman LM, Ramachandran VS. 2007. The simulating social mind: The role of the mirror neuron system and simulation in the social and communicative deficits of autism spectrum disorders. *Psychological Bulletin* 133:310-327.
- Oberman LM, Ramachandran VS. 2008. Preliminary evidence for deficits in multisensory integration in autism spectrum disorders: The mirror neuron hypothesis. *Social Neuroscience* 3:348-355.
- Oberman LM, Hubbard EM, McCleery JP, Altschuler EL, Ramachandran VS, Pineda JA. 2005. EEG evidence for mirror neuron dysfunction in autism spectrum disorders. *Brain Research Cognitive Brain Research* 24: 2 : 190-198.
- Ohnishi T, Moriguchi Y, Matsuda H, Mori T, Hirakata M, Imabayashi E, Hirao K, Nemoto K, Kaga M, Inagaki M, Yamada M, Uno A. 2004. The neural network for the mirror system and mentalizing in normally developed children: an fMRI study. *Neuroreport* 15:1483-1487.
- Onishi KH, Baillargeon R. 2005. Do 15-month-old infants understand false beliefs? *Science* 308:255-258.
- Oram MW, Perrett DI. 1996. Integration of form and motion in the anterior superior temporal polysensory area (STPa) of the macaque monkey. *Journal of Neurophysiology* 76:109-129.
- Ozonoff S, Pennington BF, Rogers SJ. 1991. Executive Function Deficits in High-Functioning Autistic Individuals - Relationship to Theory of Mind. *Journal of Child Psychology and Psychiatry and Allied Disciplines* 32:1081-1105.
- Pardo CA, Eberhart CG. 2007. The neurobiology of autism. *Brain Pathology* 17:434-447.
- Parron C, Da Fonseca D, Santos A, Moore DG, Monfardini E, Deruelle C. 2008. Recognition of biological motion in children with autistic spectrum disorders. *Autism* 12:261-274.
- Pavlova M, Krageloh-Mann I, Sokolov A, Birbaumer N. 2001. Recognition of point-light biological motion displays by young children. *Perception* 30:925-933.
- Pavlova M, Sokolov A. 2000. Orientation specificity in biological motion perception. *Perception and Psychophysics*. 62:889-899.
- Pavlova M, Sokolov A. 2003. Prior knowledge about display inversion in biological motion perception. *Perception* 32:937-946.
- Pavlova M, Sokolov A, Staudt M, Marconato F, Birbaumer N, Krageloh-Mann I. 2005. Recruitment of periventricular parietal regions in processing cluttered point-light biological motion. *Cerebral Cortex* 15:594-601.
- Pavlova M, Staudt M, Sokolov A, Birbaumer N, Krageloh-Mann I. 2003. Perception and production of biological movement in patients with early periventricular brain lesions. *Brain* 126:692-701.
- Peelen MV, Atkinson AP, Andersson F, Vuilleumier P. 2007. Emotional modulation of body-selective visual areas. *Social Cognitive and Affective Neuroscience* 2:274-283.
- Peelen MV, Wiggett AJ, Downing PE. 2006. Patterns of fMRI activity dissociate overlapping functional brain areas that respond to biological motion. *Neuron* 49:815-822.
- Peelen MV, Downing PE. 2005. Selectivity for the Human Body in the Fusiform Gyrus. *Journal of Neurophysiology* 93:603-608.
- Pellicano E, Gibson L, Maybery M, Durkin K, Badcock DR. 2005. Abnormal global processing along the dorsal visual pathway in autism: a possible

- mechanism for weak visuospatial coherence? *Neuropsychologia* 43:1044-1053.
- Pellicano E, Gibson LY. 2008. Investigating the functional integrity of the dorsal visual pathway in autism and dyslexia. *Neuropsychologia* 46:2593-2596.
- Pelphrey KA, Carter EJ. 2008. Charting the typical and atypical development of the social brain. *Development and Psychopathology*. 20:1081-1102.
- Pelphrey KA, Morris JP, McCarthy G. 2005. Neural basis of eye gaze processing deficits in autism. *Brain* 128:1038-1048.
- Pelphrey KA, Viola RJ, McCarthy G. 2004. When strangers pass - Processing of mutual and averted social gaze in the superior temporal sulcus. *Psychological Science* 15:598-603.
- Perner J, Leekam SR, Wimmer H. 1987. 2-Year-Olds Difficulty with False Belief - the Case for A Conceptual Deficit. *British Journal of Developmental Psychology* 5:125-137.
- Perrett DI, Smith PA, Mistlin AJ, Chitty AJ, Head AS, Potter DD, Broennimann R, Milner AD, Jeeves MA. 1985. Visual analysis of body movements by neurones in the temporal cortex of the macaque monkey: a preliminary report. *Behavioral Brain Research* 16:153-170.
- Persico AM, Bourgeron T. 2006. Searching for ways out of the autism maze: genetic, epigenetic and environmental clues. *Trends Neuroscience* 29:349-358.
- Persico AM, D'Agruma L, Maiorano N, Totaro A, Militerni R, Bravaccio C, Wassink TH, Schneider C, Melmed R, Trillo S, Montecchi F, Palermo M, Pascucci T, Puglisi-Allegra S, Reichelt KL, Conciatori M, Marino R, Quattrocchi CC, Baldi A, Zelante L, Gasparini P, Keller F. 2001. Reelin gene alleles and haplotypes as a factor predisposing to autistic disorder. *Molecular Psychiatry* 6:150-159.
- Peuskens H, Vanrie J, Verfaillie K, Orban GA. 2005. Specificity of regions processing biological motion. *European Journal of Neurosciences*. 21:2864-2875.
- Piaget J. 1936. *La naissance de l'intelligence chez l'Enfant*. Neuchâtel, Paris : Delachaux et Niestlé
- Piefke M, Kramer K, Korte M, Schulte-Ruther M, Korte JM, Wohlschlagel AM, Weber J, Shah NJ, Huber W, Fink GR. 2007. Neurofunctional modulation of brain regions by distinct forms of motor cognition and movement features. *Human Brain Mapping*. 30 : 2 : 432-451.
- Pinto J, Shiffrar M. 1999. Subconfigurations of the human form in the perception of biological motion displays. *Acta Psychologica (Amst)* 102:293-318.
- Plaisted K, Saksida L, Alcantara J, Weisblatt E. 2003. Towards an understanding of the mechanisms of weak central coherence effects: experiments in visual configural learning and auditory perception. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences* 358:375-386.
- Plassmann H, O'Doherty J, Rangel A. 2007. Orbitofrontal cortex encodes willingness to pay in everyday economic transactions. *Journal of Neurosciences* 27:9984-9988.
- Pollick FE, Kay JW, Heim K, Stringer R. 2005. Gender recognition from point-light walkers. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 31:1247-1265.
- Pollick FE, Paterson HM, Bruderlin A, Sanford AJ. 2001. Perceiving affect from arm movement. *Cognition* 82:B51-B61.

- Premack D, Woodruff G. 1978. Does the chimpanzee have a theory of mind? *The Behavioral and Brain Sciences* 515-526.
- Provost B, Lopez BR, Heimerl S. 2007. A comparison of motor delays in young children: Autism spectrum disorder, developmental delay, and developmental concerns. *Journal of Autism and Developmental Disorders* 37:321-328.
- Pry R, Petersen AF, Baghdadli A. 2009. Developmental changes of expressive language and interactive competences in children with autism. *Research in Autism Spectrum Disorders* 3:98-112.
- Puce A, Perrett D. 2003. Electrophysiology and brain imaging of biological motion. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 358:435-445.
- Raichle ME, MacLeod AM, Snyder AZ, Powers WJ, Gusnard DA, Shulman GL. 2001. A default mode of brain function. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 98:676-682.
- Ramnani N, Miall RC. 2004. A system in the human brain for predicting the actions of others. *Nature Neuroscience* 7:85-90.
- Redcay E, Courchesne E. 2005. When is the brain enlarged in autism? A meta-analysis of all brain size reports. *Biological Psychiatry* 58:1-9.
- Redcay E. 2008. The superior temporal sulcus performs a common function for social and speech perception: Implications for the emergence of autism. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* 32:123-142.
- Reed CL, Farah MJ. 1995. The Psychological Reality of the Body Schema - A Test with Normal Participants. *Journal of Experimental Psychology-Human Perception and Performance* 21:334-343.
- Reed CL, Stone VE, Bozova S, Tanaka J. 2003. The body-inversion effect. *Psychological Sciences*. 14:302-308.
- Reed CL, Stone VE, Grubb JD, McGoldrick JE. 2006. Turning configural processing upside down: Part and whole body postures. *Journal of Experimental Psychology-Human Perception and Performance* 32:73-87.
- Regolin L, Tommasi L, Vallortigara G. 2000. Discrimination of Johansson's biological motion displays in newborn chicks imprinted onto point-light animation sequences. *European Journal of Neuroscience* 12:253-253.
- Reid VM, Hoehl S, Striano T. 2006. The perception of biological motion by infants: An event-related potential study. *Neuroscience Letters* 395:211-214.
- Rommel E, Peters K. 2009. Theory of Mind and Language in Children With Cochlear Implants. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education* 14:218-236.
- Richter W, Richter M. 2003. The shape of the fMRI BOLD response in children and adults changes systematically with age. *NeuroImage* 20:1122-1131.
- Ring HA, Baron-Cohen S, Wheelwright S, Williams SCR, Brammer M, Andrew C, Bullmore ET. 1999. Cerebral correlates of preserved cognitive skills in autism - A functional MRI study of Embedded Figures Task performance. *Brain* 122:1305-1315.
- Ritvo ER, Freeman BJ, Masonbrothers A, Mo A, Ritvo AM. 1985. Concordance for the Syndrome of Autism in 40 Pairs of Afflicted Twins. *American Journal of Psychiatry* 142:74-77.
- Rizzolatti G, Craighero L. 2004. The mirror-neuron system. *Annual Review of Neurosciences*. 27:169-192.

- Rizzolatti G, Fabbri-Destro M. 2008. The mirror system and its role in social cognition. *Current Opinion in Neurobiology*. 18 : 2 : 179-184.
- Rizzolatti G, Fabbri-Destro M, Cattaneo L. 2009. Mirror neurons and their clinical relevance. *Nature Clinical Practice Neurology* 5:24-34.
- Rizzolatti G, Fadiga L, Gallese V, Fogassi L. 1996. Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Brain Research.Cognitive Brain Research*. 3:131-141.
- Rizzolatti G, Fogassi L, Gallese V. 2001. Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action. *Nature Review Neurosciences*. 2:661-670.
- Rizzolatti G, Arbib MA. 1998. Language within our grasp. *Trends in Neurosciences* 21:188-194.
- Rochat P. 2003. Five levels of self-awareness as they unfold early in life. *Consciousness and Cognition* 12:717-731.
- Rochat P. 2004. The emergence of self-awareness as co-awareness in early child development. *Structure and Development of Self-Consciousness: Interdisciplinary Perspectives* 59:1-20.
- Rochat P. 2007. Intentional action arises from early reciprocal exchanges. *Acta Psychologica* 124:8-25.
- Rochat P, Goubert N. 2000. Connaissance implicite du corps au début de la vie. *Enfance* 3:275-285.
- Rochat P, Goubet N, Senders SJ. 1999. To reach or not to reach? Perception of body effectivities by young infants. *Infant and Child Development* 8:129-148.
- Rochat P, Hespos SJ. 1997. Differential rooting response by neonates: Evidence for an early sense of self. *Early Development & Parenting* 6:105-112.
- Rochat P, Morgan R. 1995. Spatial Determinants in the Perception of Self-Produced Leg Movements by 3-Month-Old to 5-Month-Old Infants. *Developmental Psychology* 31:626-636.
- Rochat P, Striano T. 1999. Emerging self-exploration by 2-month-old infants. *Developmental Science* 2:206-218.
- Roche L, Schmitz C, Hernandez N, Rochat M, Martineau J. 2009. When human motion is transformed into social relationship: strategies of oculomotor exploration in adults. *Communication affichée. Congrès IRIA, Tours, France.*
- Rolls ET. 2000. The orbitofrontal cortex and reward. *Cerebral Cortex* 10:284-294.
- Ruby P, Decety J. 2003. What you believe versus what you think they believe: a neuroimaging study of conceptual perspective-taking. *European Journal of Neuroscience* 17:2475-2480.
- Saarela MV, Hari R. 2008. Listening to humans walking together activates the social brain circuitry. *Social Neuroscience* 3:401-409.
- Samson D, Apperly IA, Chiavarino C, Humphreys GW. 2004. Left temporoparietal junction is necessary for representing someone else's belief. *Nature Neuroscience* 7:499-500.
- Sanders J, Johnson KA, Garavan H, Gill M, Gallagher L. 2008. A review of neuropsychological and neuroimaging research in autistic spectrum disorders: Attention, inhibition and cognitive flexibility. *Research in Autism Spectrum Disorders* 2:1-16.
- Santos A, Deruelle C. 2009. Verbal Peaks and Visual Valleys in Theory of Mind Ability in Williams Syndrome. *Journal of Autism and Developmental Disorders* 39:651-659.

- Saxe R. 2005. Against simulation: the argument from error. *Trends Cognitive Sciences*. 9:174-179.
- Saxe R. 2006. Uniquely human social cognition. *Current Opinion in Neurobiology* 16:235-239.
- Saxe R, Kanwisher N. 2003. People thinking about thinking people. The role of the temporo-parietal junction in "theory of mind". *NeuroImage*. 19:1835-1842.
- Saxe R, Powell LJ. 2006. It's the thought that counts: specific brain regions for one component of theory of mind. *Psychological Sciences*. 17:692-699.
- Saxe R, Xiao DK, Kovacs G, Perrett DI, Kanwisher N. 2004. A region of right posterior superior temporal sulcus responds to observed intentional actions. *Neuropsychologia* 42:1435-1446.
- Saxe R, Wexler A. 2005. Making sense of another mind: the role of the right temporo-parietal junction. *Neuropsychologia* 43:1391-1399.
- Saygin AP. 2007. Superior temporal and premotor brain areas necessary for biological motion perception. *Brain* 130:2452-2461.
- Schick B, de Villiers P, de Villiers J, Hoffmeister R. 2007. Language and theory of mind: A study of deaf children. *Child Development* 78:376-396.
- Schilbach L, Eickhoff SB, Rotarska-Jagiela A, Fink GR, Vogeley K. 2008. Minds at rest? Social cognition as the default mode of cognizing and its putative relationship to the "default system" of the brain. *Conscious Cognition* 17:457-467.
- Schmitz C, Assaiante C. 2002. Developmental sequence in the acquisition of anticipation during a new co-ordination in a bimanual load-lifting task in children. *Neuroscience Letters* 330:215-218.
- Schmitz C, Assaiante C. 2008. Postural control in children with autism spectrum disorder. In: *Posture: a key issue in developmental disorders*. In Hadders-Algra M and Brogren Carlberg E, editors. London : Mac Keith Press.
- Schmitz C, Martin N, Assaiante C. 1999. Development of anticipatory postural adjustments in a bimanual load-lifting task in children. *Experimental Brain Research* 126:200-204.
- Schmitz C, Martin N, Assaiante C. 2002. Building anticipatory postural adjustment during childhood: a kinematic and electromyographic analysis of unloading in children from 4 to 8 years of age. *Experimental Brain Research* 142:354-364.
- Schmitz C, Martineau J, Barthelemy C, Assaiante C. 2003. Motor control and children with autism: deficit of anticipatory function? *Neuroscience Letters* 348:17-20.
- Schmitz N, Daly E, Murphy D. 2007. Frontal anatomy and reaction time in Autism. *Neuroscience Letters* 412:12-17.
- Schmitz N, Rubia K, Daly E, Smith A, Williams S, Murphy DGM. 2006. Neural correlates of executive function in autistic spectrum disorders. *Biological Psychiatry* 59:7-16.
- Schultz J, Friston KJ, O'Doherty J, Wolpert DM, Frith CD. 2005. Activation in Posterior Superior Temporal Sulcus Parallels Parameter Inducing the Percept of Animacy. *Neuron* 45:625-635.
- Schumann CM, Amaral DG. 2006. Stereological analysis of amygdala neuron number in autism. *Journal of Neuroscience*. 26:7674-7679.
- Sebastian C, Burnett S, Blakemore SJ. 2008. Development of the self-concept during adolescence. *Trends in Cognitive Sciences* 12:441-446.

- Sebat J, Lakshmi B, Malhotra D, Troge J, Lese-Martin C, Walsh T, Yamrom B, Yoon S, Krasnitz A, Kendall J, Leotta A, Pai D, Zhang R, Lee YH, Hicks J, Spence SJ, Lee AT, Puura K, Lehtimaki T, Ledbetter D, Gregersen PK, Bregman J, Sutcliffe JS, Jobanputra V, Chung W, Warburton D, King MC, Skuse D, Geschwind DH, Gilliam TC, Ye K, Wigler M. 2007. Strong association of de novo copy number mutations with autism. *Science* 316:445-449.
- Sebat J, Lakshmi B, Troge J, Alexander J, Young J, Lundin P, Maner S, Massa H, Walker M, Chi MY, Navin N, Lucito R, Healy J, Hicks J, Ye K, Reiner A, Gilliam TC, Trask B, Patterson N, Zetterberg A, Wigler M. 2004. Large-scale copy number polymorphism in the human genome. *Science* 305:525-528.
- Servos P, Osu R, Santi A, Kawato M. 2002. The neural substrates of biological motion perception: an fMRI study. *Cerebral Cortex* 12:772-782.
- Shafritz KM, Dichter GS, Baranek GT, Belger A. 2008. The neural circuitry mediating shifts in behavioral response and cognitive set in autism. *Biological Psychiatry* 63:974-980.
- Shah A, Frith U. 1993. Why do Autistic Individuals Show Superior Performance on the Block Design Task. *Journal of Child Psychology and Psychiatry and Allied Disciplines* 34:1351-1364.
- Shaw P, Kabani NJ, Lerch JP, Eckstrand K, Lenroot R, Gogtay N, Greenstein D, Clasen L, Evans A, Rapoport JL, Giedd JN, Wise SP. 2008. Neurodevelopmental trajectories of the human cerebral cortex. *Journal of Neurosciences* 28:3586-3594.
- Shiffrar M, Freyd JJ. 1990. Apparent Motion of the Human-Body. *Psychological Science* 1:257-264.
- Shiffrar M, Lichtey L, Heptulla CS. 1997. The perception of biological motion across apertures. *Perception and Psychophysics*. 59:51-59.
- Shim J, Carlton LG, Kim J. 2004. Estimation of lifted weight and produced effort through perception of point-light display. *Perception* 33:277-291.
- Shipley TF. 2003. The effect of object and event orientation on perception of biological motion. *Psychological Sciences*. 14:377-380.
- Siegal M, Varley R. 2006. Aphasia, language, and theory of mind. *Social Neuroscience* 1:167-174.
- Simion F, Regolin L, Bulf H. 2008. A predisposition for biological motion in the newborn baby. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105:809-813.
- Singer T. 2006. The neuronal basis and ontogeny of empathy and mind reading: review of literature and implications for future research. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 30:855-863.
- Skaar DA, Shao Y, Haines JL, Stenger JE, Jaworski J, Martin ER, DeLong GR, Moore JH, McCauley JL, Sutcliffe JS, Ashley-Koch AE, Cuccaro ML, Folstein SE, Gilbert JR, Pericak-Vance MA. 2005. Analysis of the RELN gene as a genetic risk factor for autism. *Molecular Psychiatry* 10:563-571.
- Slaughter V, Heron M, Sim S. 2002. Development of preferences for the human body shape in infancy. *Cognition* 85:B71-B81.
- Smith IM, Bryson SE. 1994. Imitation and Action in Autism - A Critical-Review. *Psychological Bulletin* 116:259-273.
- Smith M, Spence MA, Flodman P. 2009. Nuclear and mitochondrial genome defects in autisms. *Annual New York Academic Sciences*. 1151:102-132.

- Sommerville JA, Woodward AL, Needham A. 2005. Action experience alters 3-month-old infants' perception of others' actions. *Cognition* 96:B1-B11.
- Song, H.J., Baillargeon, R., 2007. Can 9.5-month-old infants attribute to an agent a disposition to perform a particular action on objects? *Acta Psychologica* 124, 79-105.
- Southgate V, Senju A, Csibra G. 2007. Action anticipation through attribution of false belief by 2-year-olds. *Psychological Science* 18:587-592.
- 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* 11:2765-2767.
- Stanfield AC, McIntosh AM, Spencer MD, Philip R, Gaur S, Lawrie SM. 2008. Towards a neuroanatomy of autism: A systematic review and meta-analysis of structural magnetic resonance imaging studies. *European Psychiatry* 23:289-299.
- Steffenburg S, Gillberg C, Hellgren L, Andersson L, Gillberg IC, Jakobsson G, Bohman M. 1989. A Twin Study of Autism in Denmark, Finland, Iceland, Norway and Sweden. *Journal of Child Psychology and Psychiatry and Allied Disciplines* 30:405-416.
- Stevens JA, Fonlupt P, Shiffrar M, Decety J. 2000. New aspects of motion perception: selective neural encoding of apparent human movements. *Neuroreport* 11:109-115.
- Stoffregen TA, Schmuckler MA, Gibson EJ. 1987. Use of Central and Peripheral Optical-Flow in Stance and Locomotion in Young Walkers. *Perception* 16:113-119.
- Striano T, Reid VM. 2006. Social cognition in the first year. *Trends Cognitive Sciences*. 10:471-476.
- Striano T, Reid VM, Hoehl S. 2006. Neural mechanisms of joint attention in infancy. *European Journal of Neuroscience* 23:2819-2823.
- Sumi S. 1984. Upside-Down Presentation of the Johansson Moving Light-Spot Pattern. *Perception* 13:283-286.
- Szatmari P, Bartolucci G, Bremner R. 1989. Aspergers Syndrome and Autism - Comparison of Early History and Outcome. *Developmental Medicine and Child Neurology* 31:709-720.
- Tager-Flusberg H. 2006. Defining language phenotypes in autism. *Clinical Neuroscience Research* 6:219-224.
- Talairach P, Tournoux J. 1988. Stereotactic coplanar atlas of the human brain. Stuttgart: Thieme
- Tanskanen T, Saarinen J, Parkkonen L, Hari R. 2008. From local to global: Cortical dynamics of contour integration. *Journal of Vision*. 8 : 7 : 15.
- Tardif C, Gepner B. 2003. L'autisme. Paris, Nathan Edition.
- Tardif C, Laine 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* 37:1469-1484.
- Taylor JC, Wiggett AJ, Downing PE. 2007. Functional MRI analysis of body and body part representations in the extrastriate and fusiform body areas. *Journal of Neurophysiology*. 98:1626-1633.
- Teitelbaum P, Teitelbaum O, Nye J, Fryman J, Maurer RG. 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 95:13982-13987.
- Thelen E, Corbetta D, Spencer JP. 1996. Development of reaching during the first year: Role of movement speed. *Journal of Experimental Psychology-Human Perception and Performance* 22:1059-1076.
- Thioux M, Gazzola V, Keysers C. 2008. Action Understanding: How, What and Why. *Current Biology* 18:R431-R434.
- Thomason ME, Burrows BE, Gabrieli JDE, Glover GH. 2005. Breath holding reveals differences in fMRI BOLD signal in children and adults. *NeuroImage* 25:824-837.
- Thornton IM, Rensink RA, Shiffrar M. 2002. Active versus passive processing of biological motion. *Perception* 31:837-853.
- Thurman SM, Grossman ED. 2008. Temporal "Bubbles" reveal key features for point-light biological motion perception. *Journal of Vision*. 8:28-11.
- Tomasello M, Carpenter M, Liszkowski U. 2007. A new look at infant pointing. *Child Development* 78:705-722.
- Troje NF. 2003. Reference frames for orientation anisotropies in face recognition and biological-motion perception. *Perception* 32:201-210.
- Troje NF, Westhoff C. 2006. The Inversion Effect in Biological Motion Perception: Evidence for a "Life Detector"? *Current Biology* 16:821-824.
- Tsakiris M, Costantini M, Haggard P. 2008. The role of the right temporo-parietal junction in maintaining a coherent sense of one's body. *Neuropsychologia* 46:3014-3018.
- Tuchman R, Moshe SL, Rapin I. 2009. Convulsing toward the pathophysiology of autism. *Brain and Development* 31:95-103.
- Tunik E, Rice NJ, Hamilton A, Grafton ST. 2007. Beyond grasping: representation of action in human anterior intraparietal sulcus. *NeuroImage*. 36 Suppl 2:T77-T86.
- Umiltà MA, Kohler E, Gallese V, Fogassi L, Fadiga L, Keysers C, Rizzolatti G. 2001. I know what you are doing: A neurophysiological study. *Neuron* 31:155-165.
- Vaina LM. 1994. Functional Segregation of Color and Motion Processing in the Human Visual-Cortex - Clinical-Evidence. *Cerebral Cortex* 4:555-572.
- Vaina LM, Gross CG. 2004. Perceptual deficits in patients with impaired recognition of biological motion after temporal lobe lesions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 101:16947-16951.
- Vaina LM, Solomon J, Chowdhury S, Sinha P, Belliveau JW. 2001. Functional neuroanatomy of biological motion perception in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 98:11656-11661.
- Vallortigara G, Regolin L, Marconato F. 2005. Visually inexperienced chicks exhibit spontaneous preference for biological motion patterns. *PLoS.Biology* 3: 7 : 1312-1316.
- van der Fits IBM, Klip AWJ, van Eykern LA, Hadders-Algra M. 1999. Postural adjustments during spontaneous and goal-directed arm movements in the first half year of life. *Behavioural Brain Research* 106:75-90.
- van Elk M, van Schie HT, Hunnius S, Vesper C, Bekkering H. 2008. You'll never crawl alone: Neurophysiological evidence for experience-dependent motor resonance in infancy. *NeuroImage* 43:808-814.

- Vandenbroucke MWG, Scholte HS, van Engeland H, Lamme VAF, Kemner C. 2008. Coherent versus component motion perception in autism spectrum disorder. *Journal of Autism and Developmental Disorders* 38:941-949.
- Vargas DL, Nascimbene C, Krishnan C, Zimmerman AW, Pardo CA. 2005. Neuroglial activation and neuroinflammation in the brain of patients with autism. *Annals of Neurology* 57:67-81.
- Viding E, Blakemore SJ. 2007. Endophenotype approach to developmental psychopathology: Implications for autism research. *Behavior Genetics* 37:51-60.
- Viel S, Vaugoyeau M, Assaiante C. 2009. Adolescence: A Transient Period of Proprioceptive Neglect in Sensory Integration of Postural Control. *Motor Control* 13:25-42.
- Villarreal M, Fridman EA, Amengual A, Falasco G, Gerscovich ER, Ulloa ER, Leiguarda RC. 2008. The neural substrate of gesture recognition. *Neuropsychologia* 46:2371-2382.
- Virji-Babul N, Kerns K, Zhou E, Kapur A, Shiffrar M. 2006. Perceptual-motor deficits in children with Down syndrome: implications for intervention. *Down Syndrome Research and Practice*. 10:74-82.
- Viviani P, Stucchi N. 1992. Biological movements look uniform: evidence of motor-perceptual interactions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 18:603-623.
- Vogeley K, Bussfeld P, Newen A, Herrmann S, Happe F, Falkai P, Maier W, Shah NJ, Fink GR, Zilles K. 2001. Mind reading: Neural mechanisms of theory of mind and self-perspective. *NeuroImage* 14:170-181.
- Vollm BA, Taylor ANW, Richardson P, Corcoran R, Stirling J, McKie S, Deakin JFW, Elliott R. 2006. Neuronal correlates of theory of mind and empathy: A functional magnetic resonance imaging study in a nonverbal task. *NeuroImage* 29:90-98.
- von Hofsten C. 2007. Action in development. *Developmental Science* 10:54-60.
- Waldvogel D, van Gelderen P, Muellbacher W, Ziemann U, Immisch I, Hallett M. 2000. The relative metabolic demand of inhibition and excitation. *Nature* 406:995-998.
- Walter H, Adenzato M, Ciaramidaro A, Enrici I, Pia L, Bara B. 2004. Understanding intentions in social interaction: the role of the anterior paracingulate cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*. 16:1854-1863.
- Warneken F, Tomasello M. 2006. Altruistic helping in human infants and young chimpanzees. *Science* 311:1301-1303.
- Watson TL, Pearson J, Clifford CWG. 2004. Perceptual Grouping of Biological Motion Promotes Binocular Rivalry. *Current Biology* 14:1670-1674.
- Wellman HM, Bartsch K. 1988. Young Childrens Reasoning About Beliefs. *Cognition* 30:239-277.
- Wellman HM, Cross D, Watson J. 2001. Meta-analysis of theory-of-mind development: The truth about false belief. *Child Development* 72:655-684.
- Wheatley T, Milleville SC, Martin A. 2007. Understanding animate agents: distinct roles for the social network and mirror system. *Psychological Sciences*. 18:469-474.
- WHO. 1992. Classification of Mental and Behavioural Disorders: Clinical descriptions and diagnostic guidelines. World Health Organization. The ICD-10.

- Wicker B, Keysers C, Plailly J, Royet JP, Gallese V, Rizzolatti G. 2003. Both of us disgusted in My insula: the common neural basis of seeing and feeling disgust. *Neuron* 40:655-664.
- Wicker B, Fonlupt P, Hubert B, Tardif C, Gepner B, Deruelle C. 2008. Abnormal cerebral effective connectivity during explicit emotional processing in adults with autism spectrum disorder. *Social Cognitive and Affective Neuroscience* 3:135-143.
- Wilke M, Schmithorst VJ, Holland SK. 2002. Assessment of spatial normalization of whole-brain magnetic resonance images in children. *Human Brain Mapping*. 17:48-60.
- Williams D. 1999. *Si on me touche, je n'existe plus*. Edition J'ai Lu.
- Williams JHG, Whiten A, Singh T. 2004. A systematic review of action imitation in autistic spectrum disorder. *Journal of Autism and Developmental Disorders* 34:285-299.
- Williams JHG, Whiten A, Suddendorf T, Perrett DI. 2001. Imitation, mirror neurons and autism. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 25:287-295.
- Wimmer H, Perner J. 1983. Beliefs About Beliefs - Representation and Constraining Function of Wrong Beliefs in Young Childrens Understanding of Deception. *Cognition* 13:103-128.
- Woodward AL. 2009. Infants' Grasp of Others' Intentions. *Current Directions in Psychological Science* 18:53-57.
- Ylisaukko-oja T, Rehnstrom K, Auranen M, Vanhala R, Alen R, Kempas E, Ellonen P, Turunen JA, Makkonen I, Riikonen R, Nieminen-von Wendt T, von Wendt L, Peltonen L, Jarvela I. 2005. Analysis of four neuregulin genes as candidates for autism. *European Journal of Human Genetics*. 13:1285-1292.
- Yoon U, Fonov VS, Perusse D, Evans AC. 2009. The effect of template choice on morphometric analysis of pediatric brain data. *NeuroImage* 45:769-777.
- Zalla T, Labruyere N, Georgieff N. 2006. Goal-directed action representation in autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders* 36:527-540.
- Zar J. 1984. *Biostatistical Analysis*. In: Pengtice Hall International, editor.
- Zilbovicius M, Meresse I, Chabane N, Brunelle F, Samson Y, Boddaert N. 2006. Autism, the superior temporal sulcus and social perception. *Trends in Neurosciences* 29:359-366.
- Zivotofsky A, Hausdorff J. 2007. The sensory feedback mechanisms enabling couples to walk synchronously: An initial investigation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 4:28 : 1-5.

INDEX DES TABLEAUX

Tableau 1 : Critères du DSM-IV pour le diagnostic du trouble autistique	56
Tableau 2 : Liste des 20 scènes sociales illustrant les interactions sociales présentées dans nos études associées à leur code.	89
Tableau 3 : Synthèse des évaluations pour évaluer 1- le quotient intellectuel total (QIT) notamment verbal (ICV, indice de compréhension verbale) et non-verbal (IRP, indice de raisonnement perceptif) avec les échelles de Weschler (WPPSI, WISC III, WISC IV) ou de Kaufman (K-ABC) en fonction de l'âge et du développement des enfants ; 2- les comportements sociaux avec l'échelle de VINELAND exprimée en années et mois ; 3- la théorie de l'esprit de premier ordre avec l'histoire de Sally et Anne (épreuve de changement de lieu) puis de second ordre avec l'histoire du grand-père (épreuve de compréhension des conséquences des émotions). IMT signifie indice de mémoire de travail et IVT indice de vitesse de traitement.....	98
Tableau 4 : Natures des IS que tous les enfants (12 / 12) de 4 à 6 ans reconnaissent et celles dont moins de la moitié (entre 6 / 12 et 4 / 12) des enfants reconnaissent. Ces IS sont classées selon les trois nuances sociales : conventions sociales, situations émotionnelles et jeux / sports collectifs. Les indices visuo-spatiaux désignent la « proximité » ou rapprochement physique ainsi que le « contact » ou toucher entre les deux acteurs de la scène.....	137
Tableau 5 : Natures des IS que tous les enfants autistes (12 / 12) reconnaissent et celles dont moins de la moitié (entre 7 / 12 et 6 / 12) des enfants reconnaissent. Ces IS sont classées selon les trois nuances sociales : conventions sociales, situations émotionnelles et jeux / sports collectifs. Les indices visuo-spatiaux désignent la « proximité » ou rapprochement physique ainsi que le « contact » ou toucher entre les deux acteurs de la scène.....	154
Tableau 6 : Activations cérébrales obtenues après analyse en effet aléatoire de groupe sur l'ensemble du cerveau dans la condition IS versus NIS. La valeur de t reflète la différence statistique entre les deux conditions. Les activations sont celles obtenues après correction pour comparaison multiple (FDR) pour un risque d'erreur inférieur à 0,05. Seules les activations de 10 voxels ont été retenues. FBA= fusiform body area, EBA= extrastriate body area. G/D: hémisphères gauche ou droit.....	161
Tableau 7 : Activations cérébrales obtenues après l'analyse en effet aléatoire de groupe dans la condition IS versus NIS chez l'enfant. La valeur de t reflète la différence statistique entre les deux conditions. Les activations sont celles obtenues après correction pour comparaison multiple (FDR) pour un risque d'erreur inférieur 0,05. Seules les activations significatives à l'intérieur d'un cluster composé de 10 voxels ont été retenues.	

(1) : cluster significatif après SVC sur la base d'une hypothèse a priori. (2) cluster significatif pour $p < 0,001$ non corrigé. FBA= *fusiform body area*. G/D: hémisphères gauche ou droit..... 173

Tableau 8 : Activations cérébrales obtenues après utilisation d'un test t de comparaison de deux groupes (two-sample t-test). Le tableau présente les activations plus importantes dans le groupe des enfants comparé au groupe des adultes dans la condition IS versus NIS. La valeur de t reflète la différence statistique entre les deux groupes. Les activations sont celles obtenues sans correction à un risque d'erreur inférieur $p < 0,001$. Seules les activations significatives à l'intérieur d'un cluster composé de 10 voxels ont été retenues. G/D: hémisphères gauche ou droit..... 174

Tableau 9 : Activations cérébrales obtenues après un test de régression négative en fonction de l'âge des enfants dans la condition IS versus NIS. La valeur de t reflète la différence statistique entre les deux conditions. Les activations sont celles obtenues sans correction à un risque d'erreur inférieur $p < 0,001$. Seules les activations significatives à l'intérieur d'un cluster composé de dix voxels ont été retenues. G/D: hémisphères gauche ou droit. 176

INDEX DES FIGURES

Figure 1 : Régions du « cerveau social » selon la définition de Saxe (Saxe, 2006). (a) Régions médianes. (b) Régions latérales. En bleu : jonction temporo-pariétale droite, en violet : région postérieure du sillon temporal supérieur droit, en vert : région extrastriée droite, en rouge : cortex préfrontal médian ventral, en jaune : cortex préfrontal médian dorsal et en blanc : région cingulaire antérieure.	18
Figure 2 : Série photographique réalisée par E. Muybridge intitulée Dancing (Fancy)	30
Figure 3 : Premières photographies de mouvements biologiques prises par E. J. Marey en 1884. Sur la photographie a, nous pouvons distinguer la personne de profil vêtue de la combinaison dotée de marqueurs attachés sur la tête et sur les articulations du bras et de la jambe. La photographie b restitue le changement spatio-temporel des positions d'un marcheur.....	31
Figure 4 : Représentation schématique de la composition des voies dorsale et ventrale. CGL : corps genouillé latéral ; V1 : cortex visuel primaire ; V2 : cortex visuel secondaire.	47
Figure 5 : Les facteurs génétiques et non génétiques qui pourraient intervenir à des stades intra-utérins et post-nataux et conduire à la trajectoire neuro-développementale si particulière dans l'autisme (Extrait de Pardo & Eberhart, 2007).	60
Figure 6 : De nombreux gènes associés à l'autisme pourraient influencer le développement cérébral à différents stades pré et post-nataux du développement de l'enfant. Ces gènes « interviennent » à des périodes critiques (ligne continue rouge) pendant des phases précises du développement (en orange). Cependant leurs zones d'influence peuvent s'étendre au-delà de ces périodes (lignes discontinues rouges). (Extrait de Pardo et Eberhart, 2007).....	64
Figure 7 : Evolution de la circonférence de la tête de patients atteints d'autisme au cours du développement. Il s'agit de la différence en pourcentage par rapport à des valeurs normatives obtenues chez des individus non-autistes (Extrait de Redcay et Courchesne, 2005a.	66
Figure 8 : Les triades de forces et de faiblesses qui caractérisent l'autisme (Adapté de Baron-Cohen, 2004)	71
Figure 9 : Illustration de l'histoire de Sally et Anne (Extrait de Frith et Frith, 1999)	76
Figure 10 : Images extraites des animations illustrant une scène avec interaction sociale (a) et sans interaction sociale (b). Ces animations sont présentées en « sticks » : les points lumineux sont reliés par des traits. Nous avons également proposé le mode de présentation en points non reliés (voir dans le texte).....	88

Figure 11 : Images extraites des animations illustrant un mouvement humain simple (a) et du mouvement aléatoire (b).....	92
Figure 12 : Répartition des scores d'intensité émotionnelle attribués aux 56 interactions sociales visualisées dans cette étude. Une même interaction sociale peut être dupliquée en fonction de l'acteur qui initie l'action et en fonction des différents angles de vue (répétition du même code en abscisse).....	95
Figure 13 : Décours temporel du protocole comportemental de reconnaissance des interactions sociales en développement.	100
Figure 14 : Décours temporel des trois épreuves du protocole comportemental de reconnaissance des IS adapté à l'autisme. Les flèches signalent le moment où l'enfant donne sa réponse. Dans l'épreuve de reconnaissance des IS, nous avons présenté les pictogrammes qui permettaient de « guider » l'enfant pour classer les animations.	103
Figure 15 : Décours temporel de la réponse hémodynamique à l'apparition d'un stimulus..	110
Figure 16 : Mise en images du dessin expérimental que nous avons adopté pour les deux études en IRMf. Un essai comprend la période d'observation de l'animation, la période où le sujet donne sa réponse puis l'intervalle interstimuli qui permet de laisser le temps à la réponse hémodynamique de diminuer.....	115
Figure 17 : Agathe, huit ans, à la sortie de son aventure scientifique. Sur cette photographie, nous pouvons observer l'ouverture du tunnel et le lit coulissant de l'IRMf (« la fusée »), l'antenne-tête (« casque de cosmonaute ») et le clavier de réponse.....	118
Figure 18 : Diagramme résumant les différentes étapes de préparation et d'analyses statistiques des données réalisées par le logiciel <i>SPM</i> . L'ordre chronologique des opérations s'effectue de la gauche vers la droite. Les procédures de préparation des images regroupent les principales étapes de réaligement, de normalisation spatiale et de lissage anatomique. Le modèle linéaire général permet d'obtenir les cartes statistiques non corrigées. La théorie des champs gaussiens permet de déduire des cartes statistiques la significativité corrigée de chaque région.....	120
Figure 19 : Profil des réponses obtenues au cours de l'épreuve exprimé en nombre de réponses, en fonction du type de comportement, indépendamment de la catégorie et du mode de présentation, sur l'ensemble des 112 essais proposés.	133
Figure 20 : Histogrammes illustrant l'effet développemental quel que soit le mode de présentation pour reconnaître une interaction sociale (A) ou une non-interaction sociale (B).....	135

Figure 21 : Histogrammes illustrant le nombre moyen de réponses correctes par catégorie quel que soit le mode de présentation pour chacun des groupes d'âges : 4 / 6 ans, 7 / 8 ans, 9 / 10 ans et adultes.	136
Figure 22 : Profil de réponses obtenues au cours de l'épreuve exprimé en nombre de réponses en fonction du type de réponses possibles, indépendamment de la catégorie et du mode de présentation, sur l'ensemble des 104 essais proposés.	147
Figure 23 : Graphiques représentant l'effet groupe obtenu sur le temps de réaction pour catégoriser les interactions sociales (A) et l'effet inter-catégorie pour le groupe des enfants avec autisme (B).	149
Figure 24 : Graphiques représentant l'effet groupe obtenu sur le nombre de réponses correctes (A) et sur le temps de réaction (B), indépendamment du mode de présentation. Le graphique C illustre l'effet entre le mode stick et point, indépendamment du groupe d'enfants.	150
Figure 25 : Graphiques représentant les coefficients de corrélation entre le quotient intellectuel de performance et le pourcentage de réponses correctes pour reconnaître une IS (A) et une NIS (B).	152
Figure 26 : Histogramme représentant le nombre de réponses correctes lors de la reconnaissance d'interactions sociales fortement émotionnelles (A) et faiblement émotionnelles (B) au sein des trois groupes d'enfants. Max. est le nombre total d'essais proposés.	153
Figure 27 : Activations significatives ($p < 0,05$ corrigé) analysées en effet aléatoire (RFX) lors de l'observation d'animations avec interactions sociales (IS) versus sans interaction sociale (NIS). Les activations de groupes sont représentées sur une image anatomique normalisée d'un des cerveaux des sujets adultes. D/G = hémisphères droit et gauche ; pSTS = sillon temporal supérieur postérieur ; TPJ = jonction temporo-pariétale ; FBA = <i>fusiform body area</i> ; EBA = <i>extrastriate body area</i> ; dMPFC = cortex préfrontal médian dorsal ; IFG = gyrus frontal inférieur ; PM = cortex pré-moteur ; IaPS = sillon intrapariétal.	162
Figure 28 : [IS > NIS] Activations significatives ($p < 0,05$ corrigé ou $p < 0,001$ non corrigé) analysées en effet aléatoire (RFX) lors de l'observation d'animations avec interactions sociales (IS) versus sans interaction sociale (NIS). Les activations de groupes sont représentées sur une image anatomique normalisée d'un des cerveaux des sujets enfants. D/G = hémisphères droit et gauche ; pSTS = sillon temporal supérieur postérieur ;	

dMPFC = cortex préfrontal médian dorsal ; IFG = gyrus frontal inférieur ; PM = cortex pré-moteur ; ITG = gyrus temporal inférieur. 173

Figure 29 : [Enfant > Adulte] pour le contraste [IS > NIS]. Variations d'activité significativement ($p < 0,001$ non corrigé) plus importantes dans le groupe des enfants que dans le groupes de adultes lors de l'observation d'animations avec interactions sociales (IS) versus sans interaction sociale (NIS). Les activations de groupes sont représentées sur une image anatomique normalisée d'un des cerveaux des sujets enfants. D/G = hémisphères droit et gauche. A gauche : gyrus occipital médian ; au centre : gyrus occipital inférieur ; à droite : précunéus. 175

Figure 30 : Variations d'activité en fonction de l'âge des sujets dans le contraste IS > NIS : [régression négative]. Les régions dont les variations d'activation diminuent en fonction de l'âge sont le gyrus occipital médian (gauche) et le précuneus (droite). 176

Figure 31 : Variations du signal en fonction de l'âge des enfants (exprimé en mois) pour les deux régions significatives dans l'analyse de régression négative (pour le contraste IS > NIS avec comme régresseur l'âge) : le précuneus et le gyrus occipital médian. 177

PUBLICATIONS

PUBLICATIONS DANS DES REVUES INDEXEES

Diguet E, Fernagut PO, Normand E, **Centelles L**, Mulle C, Tison F. (2004). Experimental basis for the putative role of GluR6/kainate glutamate receptor subunit in Huntington's disease natural history. *Neurobiology of Disease* 15: 667-675

Centelles L, Assaiante C, Nazarian B, Anton JL, Schmitz C. Contribution of motor simulation to the understanding of social interactions. *Soumis à NeuroImage*

Jover M, Schmitz C, **Centelles L**, Chabrol B, Assaiante C. Anticipatory postural adjustments in a bimanual load-lifting task in children with developmental coordination disorder. *Soumis à Developmental Medicine & Child Neurology*

Schmitz C, **Centelles L**, Roth M, Bouvard M, Assaiante C. Understanding social interactions using body motion perception: a developmental fMRI study. *En préparation*

Centelles L, Assaiante C, Schmitz C. Development of the ability to recognize observed social interactions through body language. *En préparation*

Centelles L, Etchegoyhen K, Assaiante C, Schmitz C, Bouvard M. Understanding social interaction in children with autistic spectrum disorders: does human motion talk to them? *En preparation*

CHAPITRES D'OUVRAGE

Centelles L, Schmitz C., Assaiante C., Bioulac B., Bouvard M. Etude comportementale sur la Représentation du Mouvement Humain dans l'autisme: Résultats préliminaires chez l'adulte et l'enfant sains. *Bulletin de l'arapi*. Numéro 16- Décembre 2005

Jover M., Schmitz C., **Centelles L**, Bosdure E., Chabrol B., Assaiante C. (2005). Déficit moteur en pathologies développementales: ajustement postural anticipé. In J. Corraze & J.M. Albaret (Eds), *Entretiens de Bichat – Entretiens de Psychomotricité 2005*. Paris, Expansion Scientifique Française, pp. 109-113.

RESUMES PUBLIES

Jover M., **Centelles L.**, Schmitz C., Brun F., Chabrol B. and Assaiante C. (2005). Anticipatory postural adjustments in a bimanual load-lifting task in children with developmental coordination disorder. *Gait and Posture* 21 (1): 86

Centelles L, Diguet E, Fernagut P.O, Bioulac B and Tison F. (2005). Long term motor and cognitive consequences of combined MPTP + 3-nitropropionic acid (3-NP) administration in mice : relevance for striatonigral degeneration (SND). *Gait and Posture* 21 (1): 59

COMMUNICATIONS AFFICHEES

Schmitz C, **Centelles L**, Roth M, Assaiante C. Understanding social interactions using body motion perception: a developmental fMRI study. 15th Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping. 18-23 Juin 2009, San Francisco, USA

Centelles L, Assaiante C, Etchegoyhen K, Bouvard M, Schmitz C. Understanding social interaction in children with autistic spectrum disorders: does human motion talk to them? International Conference on Innovative Research In Autism. 15-17 avril 2009, Tours

Centelles L, Assaiante C, Anton JL, Nazarian B, Etchegoyhen K, Bouvard M et Schmitz C. Représentation du mouvement humain dans un contexte d'interaction sociale chez des enfants avec autisme. 9ème Université d'Automne de l'arapi : 9-13 octobre 2007, Le Croisic

Centelles L, Assaiante C, Anton JL, Nazarian B, Schmitz C. Human motion in the context of sociale interaction: An event-related fMRI study. The Organization of Human Brain Mapping, 13th Annual Meeting: 10-14 juin 2007, Chicago, USA

Schmitz C, **Centelles L**, Assaiante C. Influence of action coherence in the representation of human : An fMRI study. The Organization of Human Brain Mapping, 13th Annual Meeting: 10-14 juin 2007, Chicago, USA

Centelles L, Assaiante C, Anton JL, Nazarian B, Bouvard M, Schmitz C. A developmental study of the brain basis underlying social interactions. PENS/Hertie Winter School « Brain basis of Social Interaction : From concepts to imaging » : 10 au 17 décembre 2006, Kitzbuehel, Autriche

Centelles L, Assaiante C, Anton JL, Nazarian B, Bouvard M, Schmitz C. Representation of Human Motion in a context of social interaction : An fMRI study. Atelier de formation n°170 organisé par l'Inserm « L'autisme, de la clinique à la neurobiologie : propositions de stratégies de recherche » : 19 et 20 octobre 2006, Paris

Centelles L, Assaiante C, Anton JL, Nazarian B, Bouvard M, Schmitz C. Représentation du mouvement humain dans un contexte d'interaction sociale : Etude développementale. Journée Scientifique « Mémoire et Vieillesse Cognitive » Hommage à FIM Craik : 22 septembre 2006, Bordeaux

Centelles L, Schmitz C, Bouvard M, Assaiante C. Representation of Human Motion in a context of social interaction : A developmental study. Social Brain 2, See The Bigger Picture : 2-3 mars 2006, Glasgow, Ecosse

Centelles L, Schmitz C, Assaiante C, Bioulac B, Bouvard M. Représentation du Mouvement Humain dans l'autisme : Résultats préliminaires chez l'adulte et l'enfant sain. 8ème Université d'Automne de l'arapi : 5-9 octobre 2005, Le Croisic

COMMUNICATIONS ORALES

Centelles L, Assaiante C, Anton JL, Nazarian B, Bouvard M, Schmitz C. Les interactions sociales en réalité virtuelle : Approche en neuroimagerie. Premières journées. Réalités Virtuelles et Incapacités cognitives. Organisées par l'Institut Fédératif de Recherches, Réseau Handicap IFR 25 et Center for Spoken Language Research, USA : 2 et 3 mai 2007, Bordeaux

Centelles L, Assaiante C, Anton J-L, Nazarian B, Bouvard M, Schmitz C. Représentation du Mouvement Humain dans un contexte d'interaction sociale chez l'enfant

sain et avec autisme : Etude en IRMf. Séminaire du Groupe de Travail au service de psychiatrie de l'enfant et de l'adolescent, Hôpital Charles Perrens, 3 mai 2006, Bordeaux

Centelles L, Schmitz C, Anton J-L, Nazarian B, Bouvard M, Assaiante C. Représentation du Mouvement Humain dans un contexte d'interaction sociale : Etude développementale en IRMf. Séminaire du Groupe de Travail du Centre IRMf de la Timone, 9 Janvier 2006, Marseille

Centelles L, Schmitz C, Assaiante C, Bouvard M. Human Motion Recognition : Behavioural study in healthy children .Symposium Multidimensional Aspects of Neuroplasticity, a Federative Field of Research : 8-9 décembre 2005, Marseille

ANNEXES

**EVALUATION DE L'EVENTUEL EFFET DE LA PERSPECTIVE ET DU
MODE DE PRESENTATION SUR LA COTATION EN EMOTION DES
INTERACTIONS SOCIALES**

Cotation qualitative		Proportion des cotations attribuées aux IS (%)			
Emotion 0	Pas	13			
Emotion 1	Peu	15			
Emotion 2	Moyenne -	21			49
Emotion 3	Moyenne +	24			
Emotion 4	Forte	19			
Emotion 5	Très forte	8			51
Angles de vue		"Profil"		"Face à face"	
Emotion 0	Pas	14		12	
Emotion 1	Peu	13		17	
Emotion 2	Moyenne -	22	48	21	49
Emotion 3	Moyenne +	24		25	
Emotion 4	Forte	19		19	
Emotion 5	Très forte	8	52	7	51
Présentations		Points		Sticks	
Emotion 0	Pas	16		10	
Emotion 1	Peu	16		14	
Emotion 2	Moyenne -	20	52	22	46
Emotion 3	Moyenne +	26		23	
Emotion 4	Forte	16		22	
Emotion 5	Très forte	7	48	9	54

Tableau illustrant les différentes cotations d'intensité émotionnelle (en pourcentage) données par les sujets adultes de développement typique en fonction des perspectives et des modes de présentation sous lesquels les interactions sociales ont été présentées. Les résultats montrent que ni l'angle de vue, ni le mode de présentation, n'influencent la cotation en émotion.

COTATION EN EMOTION DES INTERACTIONS SOCIALES

Code	Types d'interactions sociales	Cotation
IS17	Montrer quelque chose en haut	1
IS9	Proposer à quelqu'un de s'asseoir	1
IS4	Jouer au football	1
IS16	Se saluer comme au judo	2
IS14	Faire la révérence	2
IS1	Se serrer la main	2
IS19	Interpeller pour dire un secret	2
IS8	Faire de l'escrime	2
IS18	Montrer quelque chose en bas	2
IS10	Agiter les mains pour se dire « au revoir »	2
IS15	Etre rattrapé lors d'une chute	2
IS20	Se faire la bise	2
IS6	Jeux de mains enfantins	3
IS2	Se faire gronder	3
IS12	Faire peur à l'autre	3
IS11	Etre heureux de se retrouver	4
IS13	Se faire renvoyer	4
IS5	Pleurer et se faire consoler	4
IS3	Partager sa joie	4
IS7	Danser la valse	4

Tableau présentant les 20 interactions sociales proposées et la cotation en intensité émotionnelle associée (échelle de 1 à 5). Ces cotations ont été attribuées par 14 adultes de développement typique.