

Troubles du spectre de l'autisme: stratégies compensatoires

Fabienne Giuliani, Pierre El Korh

Prilly, Switzerland

Summary

The effective compensation strategies developed by people suffering from autism spectrum disorders

This article proposes an explanation of the sensory-motor reflex deficiencies associated with autism spectrum disorders (ASDs). We have aimed to explain these disorders by analyzing basic anticipatory mechanisms, such as sensory processing and the musculoskeletal system, comparing the different mechanisms observable across the range of ASDs. We have sought to categorize the different anticipatory mechanisms as either: 1) anticipatory mechanisms manifesting for the environment. Furthermore, we have worked on the assumption that ASD sufferers remain in a reactive state, maintaining a constant process of perception feedback. Rather than processing a continual dynamic stream of information, these individuals rather break down information in a localized and static manner, consequently using such compensation reaction strategies of discrimination as are laid out in the parallel cognitive maps.

To end with, we have hypothesized that a great capacity of anticipation is needed to compensate for these individuals' lack of flexibility in their manipulation of complex spatial references associated with context. As a result, autism spectrum disorders affect the anticipatory mechanisms that enable people to no longer depend on concomitant sensory input in order to adjust their behavior.

Key words: anticipatory mechanisms; autism spectrum disorders; sensory processing; musculoskeletal system

Introduction

L'anticipation permet de préparer la survenue future d'un événement et d'agir en accord avec cette préparation. Elle dépend donc de la prédiction du futur immédiat. Anticipation et prédiction ne sont pas synonymes: la prédiction est la représentation spécifique d'un événement qui va survenir, tandis que l'anticipation prépare et programme l'action fondée sur une prédiction explicite ou implicite. En fonction de l'action à accomplir, le sujet présente une phase préparatoire signalant ainsi son anticipation.

Anticipation, quelles particularités rencontrons-nous dans les troubles du spectre de l'autisme (TSA)?

Comme l'a dit A. Berthoz: «*Le cerveau prédit et parie*» [1]. Il crée des scénarios possibles et il estime les risques. Depuis quelques années, les connaissances ont beaucoup progressé sur les aspects cognitifs de l'anticipation en relation avec le vécu autobiographique, l'imagination, la conception de scénarios pour le futur. Dans les manifestations de l'anticipation, plusieurs niveaux sont à distinguer et nous en citerons que deux:

- des mécanismes anticipateurs prédisposés par le bagage génétique. Ils agissent à différents niveaux d'organisation, de l'élémentaire au cognitif, du local au global, de l'actuel à l'imaginaire;
- des modes d'anticipation particuliers dans un contexte de TSA adaptés à partir des prédispositions.

C'est ce que nous allons essayer de distinguer dans cet article. Nous allons regrouper ces niveaux dans deux ordres de mécanismes tels que défini par Berthoz [1] et nous allons essayer d'élaborer une compréhension des spécificités du traitement dans les TSA uniquement par rapport aux capteurs sensoriels et au système locomoteur:

Mécanismes anticipateurs liés au bagage génétique

L'anticipation est une propriété fondamentale du vivant comme l'a démontré A. Berthoz dans la simplicité [2], puis dans anticipation et prédiction [1]. Comme il l'a expliqué: «*la notion d'anticipation cache en réalité une multiplicité de mécanismes apparus au cours de l'évolution et qu'on trouve à tous les niveaux d'organisation du système nerveux.*» Il préconise de parler alors de mécanismes anticipateurs. Ce que nous allons faire. Nos connaissances actuelles en mathématiques, en physique, en biologie ont enrichi la notion d'anticipation avec les notions de probabilité, de prédiction et d'intention. A. Berthoz a démontré dans ses différents ouvrages que la perception était un projet

d'action [3] et même une action simulée. Dans son ouvrage *La décision* [4], il a illustré que l'émotion est un facteur d'anticipation jouant un rôle de régulateur dans l'homéostasie du fonctionnement cérébral. Dans *La simplicité* [2], il soutient la thèse que l'anticipation est un des principes simples qui permet au vivant de trouver des solutions efficaces à ses problèmes de survie. Enfin, dans *La vicariance* [5], il reprend le terme d'anticipation sur la question du choix de stratégies pour l'action les mieux adaptées aux circonstances.

Aujourd'hui, l'évolution des concepts des sciences cognitives nous a fait voir les mécanismes anticipateurs comme des systèmes dynamiques. Passé et futur apparaissent liés entre eux par un va-et-vient autour du présent. Les psychologues parlent aussi de «voyage mental». Ainsi l'identité de l'individu n'est plus fixe mais apparaît comme le produit d'un processus en constant changement qui se déroule entre les axes du passé et du futur, de l'accompli au projeté. Le projet de l'action est constitué en fonction des succès et des échecs du passé, filtrés par le contexte présent et par la visée des buts, eux aussi changeants.

Anticiper, c'est parier. Le cerveau est: «comme un joueur qui fait continuellement des évaluations de probabilité» [1]. Cette idée est appuyée par certaines théories de l'anticipation qui proviennent de la théorie des probabilités et de l'inférence. Le groupe de Karl Friston [6, 7] défend l'idée qu'au cours d'une action, les centres corticaux ne se contentent pas d'émettre des commandes motrices, mais font une inférence active: les messages descendants vers la moelle épinière contiendraient des prédictions proprioceptives sur l'état dans lequel pourraient être les récepteurs proprioceptifs. Quant aux informations ascendantes, elles renseigneraient le cortex non pas sur l'état actuel des parties du corps mais sur les erreurs commises lors d'une telle prédiction. La pertinence biologique de ces modèles probabilistes fait l'objet d'un vif débat [8].

Un processus en constant changement qui se déroule entre les axes du passé et du futur, de l'accompli au projeté ...

Dans cet article, nous allons réduire notre champ d'explication des particularités des mécanismes anticipateurs dans les TSA au fonctionnement des capteurs sensoriels et de l'appareil locomoteur. Ainsi donc, en reprenant les concepts de d'Alain Berthoz à propos de l'anticipation, nous vous proposons d'expliquer les déficits des automatismes sensorimoteurs qui accompagnent les TSA. Ces troubles sont relativement aisés à expliquer dans le cadre de la motricité et du compor-

tement non nécessairement cognitif. Cependant, leur nature fait supposer qu'ils affectent de manière équivalente la cognition et la pensée. D'une manière générale, ils affectent les mécanismes d'anticipation qui permettent à la personne de ne pas dépendre des entrées sensorielles concomitantes pour ajuster son comportement, en faisant des détours.

Mécanismes anticipateurs des capteurs sensoriels et appareil locomoteur dans les TSA

Comme l'a écrit A. Berthoz [1], l'anticipation est préinscrite dans le fonctionnement même des capteurs sensoriels. Les fuseaux neuromusculaires de nos muscles mesurent en même temps la longueur et la vitesse d'étirement du muscle. C'est une mesure dynamique qui a la propriété de compenser, par avance de phase, la lenteur de la réponse musculaire, ce qui donne au réflexe myotatique une capacité de réponse plus rapide. Comme il est décrit dans les manuels diagnostics des troubles du spectre de l'autisme (TSA), une des caractéristiques des TSA est le maniérisme moteur caractérisé soit par une raideur ou une mollesse du corps qui est visible dans les déplacements ainsi dans les habiletés motrices (par une mauvaise coordination). Certains auteurs ont donné une explication à ces caractéristiques liées au fait qu'il s'agit de mesure dynamique, dynamisme déficitaire dans les TSA [9–11]. Pour notre part, nous faisons l'hypothèse que le déficit retrouvé dans les TSA est une incapacité liée aux mécanismes anticipateurs. Nos observations cliniques nous ont permis de voir qu'effectivement au niveau de la réponse musculaire apparaît une mauvaise coordination de l'appareil locomoteur. Nos patients nous ont transmis des témoignages suivants:

La plupart nous ont informé de leurs grandes difficultés dans l'apprentissage de l'écriture, difficulté à rendre automatique ce mécanisme; à apprendre à faire les nœuds des chaussures, à colorier, à apprendre à faire du vélo ou encore à applaudir dans le rythme imposé. Plus largement, ils nous expriment aussi leur difficulté à être habile dans les jeux de ballon, de tennis, de badminton ou au ping-pong. Ils expriment tous leurs difficultés à anticiper les trajectoires de leur propre action mais aussi des actions des autres et ils nous font part de leur réel problème d'ajustement.

D'autre part, nous savons également que les capteurs vestibulaires mesurent l'accélération de la tête, ce qui leur permet, sinon d'anticiper au sens strict, du moins d'améliorer la dynamique de la réponse à des perturbations. Ils mesurent aussi la secousse, dérivée de l'accélération [12].

Toutefois, une telle anticipation temporelle ne s'arrête peut-être pas à la contribution des propriétés dynamiques des capteurs, fusoriaux ou vestibulaires, à l'anticipation du mouvement. Par exemple, Roll et al. [13, 14] ont montré qu'une stimulation vibratoire de certains groupes de fuseaux neuromusculaires induit une perception de la forme du geste, en dépit du fait que le membre concerné reste immobile. Nous avons posé la question aux différents patients que nous suivons concernant la perception d'une forme imaginée et ceux-ci nous ont expliqué que l'action imaginée induisant une forme restait problématique car la consigne étant large, beaucoup de formes pouvaient être imaginées et donc aucune forme apparaissait clairement dans leur esprit. En supposant que l'anticipation dynamique par ces capteurs permet au cerveau de prédire la forme du mouvement et qu'elle ne procure pas seulement une avance temporelle, peut-on présumer d'une absence d'anticipation (incapacité à sélectionner une forme déterminée) mais également de prédiction du mouvement (incapacité à estimer la vitesse de déplacement) dans les TSA?

La vision est le siège de nombreux mécanismes anticipateurs, par exemple l'orientation du regard vers une cible. Le premier mécanisme anticipateur concerne le mécanisme de production de la saccade oculaire qui permet d'atteindre une cible. Dans le cortex pariétal, les neurones visuels ont un «champ récepteur». Land [15] a appelé cette aire le «schema control». Ces champs récepteurs ne sont pas fixes. Lorsque nous allons faire une saccade, ce champ dévie en direction de la cible, anticipant ainsi par un changement de référentiel le lieu où va se projeter le regard. Un autre mécanisme plus élaboré concerne le colliculus supérieur. Le monde visuel est représenté sur la rétine selon une carte sphérique. Mais sur le colliculus supérieur il est représenté sur une carte log-polaire (système de coordonnées logarithmiques à 2D). Sur la simulation des modèles théoriques [16], on peut considérer que la transformation géométrique d'une représentation sphérique en représentation dans le plan permet de préparer la commande motrice de guidage du regard par le système oculomoteur. C'est une catégorie particulière d'anticipation rendue possible par une modification de l'architecture neuronale qui permet de gagner du temps et de simplifier et d'acquiescer de l'efficacité. Considérant cet aspect comme étant différent dans le traitement du signal visuel dans les TSA doit-on voir cela comme une absence d'anticipation ou une simplification extrême du signal entrant?

De nombreux auteurs ont montré les difficultés majeures rencontrées par les TSA dans la poursuite d'une cible dynamique [17–21]. Ces difficultés ont été expli-

quées en partie par l'utilisation de la vision périphérique. Doit-on y voir un changement majeur de représentation?

Reprenons l'exemple de Berthoz [1] de la capture d'un objet en mouvement. Le cerveau peut adopter deux stratégies, dont chacune met en œuvre un mode particulier d'anticipation:

- il peut tenter de poursuivre l'objet en mouvement et le capturer en allant à la même vitesse que l'objet;
- il peut provoquer une interception de l'objet avant que celui-ci ne passe devant son corps [22].

La personne TSA se trouve dans un système d'ajustement et donc de réaction plutôt que de prédiction.

L'enregistrement de l'activité cérébrale par magnétoencéphalographie [23–27] au cours de la capture a permis de trouver pour la première fois des activités très précoces dans les aires visuelles V1/V2 et dans l'aire du mouvement MT à des délais incompatibles avec la localisation du traitement du signal dans les voies visuelles corticales où ce traitement est assez lent. Au vu de ce qui précède, doit-on voir dans les TSA une utilisation privilégiée et plus systématique de l'interception de l'objet plutôt que de la capture de l'objet. L'exemple du robot cité par Berthoz [1] assurant la tâche d'attraper une balle démontre à quel point la tâche est complexe: «il faut une précision au contact main-balle de l'ordre du centimètre et de la milliseconde (dont nous avons déjà dit précédemment qui fait défaut dans les TSA) et d'un modèle très précis de la balle (masse, forme, coefficients aérodynamiques; négliger la résistance de l'air en supposant une trajectoire balistique entraîne une erreur supérieure au décimètre pour lancer à quelques mètres).» Avec cet exemple, on peut penser que l'interception est du domaine de l'ajustement très précis d'une réaction, tandis que la capture nécessite la prédiction. Ainsi donc, la personne TSA se trouve dans un système d'ajustement et donc de réaction (réaction immédiate d'une action en cours) plutôt que de prédiction. Cela pourrait être un ajustement par un mécanisme compensatoire à propos du déficit dans les poursuites dynamiques. Pour confirmer cette hypothèse, il faudrait reproduire l'expérience de Ffytche [27].

Dans le répertoire des mouvements des yeux, la poursuite visuelle a également une fonction prédictive. Par exemple, si on présente une cible en mouvement qui va de gauche à droite et revient de façon cyclique, au premier passage, l'œil va suivre avec un retard attribuable à la complexité du circuit de la poursuite de cette cible. Mais dès le deuxième ou le troisième cycle,

L'œil anticipe la cible. Par contre, cette avance de phase par rapport à la cible, lorsque la personne s'adapte à une consigne connue, n'a pas été retrouvée dans les TSA [18, 28, 29].

Les mécanismes en jeu sont encore mal connus mais on sait que dans ce processus un signal dit «extra-rétinien» joue un rôle important. Lebranchu et al. [30] ont démontré que le siège de l'interaction de ce signal extra-rétinien avec les signaux issus de la rétine est plus proche des aires visuelles primaires qu'on ne le pensait. On peut donc penser que l'utilisation préférentielle de la vision périphérique dans les TSA est une adaptation fabuleuse pour permettre la compensation de la lenteur des capteurs vestibulaires.

Mouvement du corps comme outil d'anticipation

Darwin est le premier à décrire le lien entre la posture et l'émotion chez les animaux [31], élément repris par Panksepp [32]. Les mécanismes de l'anticipation motrice se situent à divers niveaux du système nerveux central. C'est une composante importante de l'agentivité, c'est-à-dire de la conscience que nous avons d'être l'agent de nos actions. Une anticipation motrice influence la perception. Un bel exemple donné par Berthoz [1] est le chatouillement: nous ne pouvons pas nous chatouiller nous-même. Cela est dû à des mécanismes anticipateurs [33] qui inhibent les effets du chatouillement lorsqu'il est fait par le sujet lui-même. Y a-t-il un lien entre l'anticipation et l'hyper- ou l'hyporéactivités sensorielles? Nos patients nous ont relaté leur inconfort lorsqu'ils sont touchés par autrui, même une poignée de main est désagréable, le jet de la douche peut être déplaisant. Certaines matières sont carrément à bannir et les élastiques sur leur peau sont redoutables, c'est pourquoi, la majorité des femmes TSA ne porte pas de soutien-gorge et lorsqu'elles ont leurs règles, elles sont incapables d'utiliser des tampons hygiéniques. Les serviettes hygiéniques irritent leur peau. La vie courante devient un enfer. Elles nous ont fait part également de leur préférence à sentir les objets plutôt qu'à les toucher, ce qui est une gêne pour eux car elles savent que «*cela ne se fait pas*» et elles avouent le faire en cachette.

Revenons sur l'anticipation motrice. Lorsque nous apprenons un geste complexe, le cortex préfrontal est d'abord activé. Dès que l'action est apprise, cette activation sélective du cortex préfrontal disparaît et la tâche est confiée à des boucles fonctionnelles impliquant le cortex frontal, les ganglions de la base et le cervelet. Cette automatisation permet de libérer le cortex frontal pour apprendre des tâches nouvelles. Nous supposons

que dans les TSA [34] les cortex préfrontal et frontal ne sont jamais libérés, ce qui accentue l'énergie octroyée dans le traitement des signaux entrants. Le filtrage de la réalité constitue une capacité vitale qui nous permet de maintenir nos actions en phase avec la réalité dans un flux libre et/ou constant de signaux entrants et qui se réfère à notre passé. Dans les TSA, nous supposons que les actions ne sont pas en phase avec la réalité à cause du flux entrant. De plus, ceci aboutit aussi au fait que toutes les séquences motrices ne sont pas automatisées. Ce filtrage faisant défaut dans les TSA, il soutient notre explication d'une absence d'automatisation. En reprenant la théorie de la forme (*Gestalt*), on pourrait dire qu'on ne passe jamais d'une anticipation séquentielle à une anticipation globale.

Comme nous l'avons évoqué précédemment, un exemple de l'utilisation de l'anticipation séquentielle et non globale dans les TSA est la marche (on parle de maniérisme moteur).

La marche implique des mécanismes rythmiques automatiques, dont les générateurs sont dans la moelle épinière, les centres de sélection dans le tronc cérébral et les ganglions de la base, les centres de coordination avec la posture dans le cervelet, les centres de planification dans le cortex cérébral et l'hippocampe. Nous savons que:

- la trajectoire chez l'adulte est de plus en plus stéréotypée;
- la direction est anticipée par le regard. La trajectoire est guidée par l'orientation successive des yeux, de la tête, du tronc et des pieds [35–37]; les travaux de Bennequin et al. [38] ont même démontré que dans le noir, nos yeux continuent de guider notre trajectoire.

L'étude de Belmonti et al. [39] a démontré que le développement de l'anticipation du regard pendant la marche au cours de l'ontogenèse est mis en place en même temps que les capacités cognitives de manipulation des référentiels spatiaux complexes engagées vers 10 ans.

La manipulation des référentiels spatiaux complexes dans les TSA est-elle déficitaire? Peut-on voir l'utilisation systématique du système séquentiel afin de planifier des segments successifs comme une forme de compensation? Les personnes TSA vivent-elles dans un monde de codage égocentré? C'est ce que nous supposons [34, 40]. Ce codage constitue une donnée de base, liée à la morphologie fonctionnelle des connexions sensori-motrices qui décompose le monde selon un répertoire de propriétés prédéterminées. Cette même morphologie fonctionnelle assure ensuite une recombinaison, un liage, une combinaison, une synthèse. Ce mode de traitement est vraisemblablement destiné à

simplifier la neuro-computation et réduire rapidement la complexité du monde visuel, ce qui est indispensable pour guider l'action et prendre des décisions [41]. Il semble ainsi que les TSA n'effectueraient pas de discrimination dans le traitement des informations sensorielles [42] et que leur difficulté à recomposer la complexité du monde proviendrait d'un problème dans la prise en compte des différentes facettes des connexions sensori-motrices non intégrées. Malgré tout, il faudra encore de nombreuses études afin d'appréhender le problème et de confirmer nos hypothèses. Néanmoins, cette hypothèse est compatible avec le fait que l'imagination et la planification exigent du cortex, des régions du parahippocampe et de l'hippocampe une activation beaucoup plus forte [43]. La théorie de la carte cognitive introduite par Tolman [44], reprise ensuite par O'Keefe et Nadel [45] et récupérée avec une grande originalité par Jacobs et Schenk [46] permet d'aller dans ce sens. L'avancée majeure dans cette théorie est le concept de traitement parallèle des fonctions hippocampiques développé par Jacobs et Schenk [46]. Ces auteurs démontrent l'existence de deux systèmes parallèles dans le traitement visuel dont l'intégration des informations fait apparaître une représentation allocentrique et non plus égocentrique. En croisant les informations que nous avons compilées précédemment, nous constatons que dans les TSA, à chaque niveau d'organisation, il apparaît clairement une altération de l'organisation élémentaire des mécanismes anticipateurs, altérations que nous retrouvons dans des niveaux plus complexes, comme le niveau cognitif et le niveau de l'imagination. Ces altérations sont compensées par le système séquentiel et par un codage égocentré et kinesthésique. La question qui peut se poser actuellement est celle-ci: est-ce que l'altération que nous avons retrouvé au niveau de l'organisation élémentaire se retrouve-t-elle en cascade sur les niveaux d'organisation plus élevés ou est-ce qu'il y a à chaque niveau d'organisation de multiples altérations qui se cumulent pour aboutir à un fonctionnement cérébral dont la compensation se situe au niveau local?

Ce qui semble sûr, c'est que la recherche de stabilité et de tout ce qui est immuable reste une composante majeure des TSA. Comme l'ont fait remarquer les auteurs [46] dans leur théorie, il est possible de dissocier les informations sans les exploiter en parallèle afin d'utiliser au mieux les informations d'un point de vue élémentaire, c'est ce que nous pensons qu'il se

produit dans les TSA. Prenons l'exemple d'un environnement dans lequel on ne s'est jamais trouvé. Il apparaît tout d'abord nouveau, puis l'exploration visuelle le rend familier. La transition de la nouveauté à la familiarité suppose qu'au cours de l'activité exploratoire visuelle, on intègre et mémorise certain nombre d'informations. Les caractéristiques d'une situation constituent la référence nécessaire pour la détection ultérieure de la nouveauté [47]. Chez les TSA, l'établissement de la familiarité est plus difficile car tout semble apparaître comme nouveau (absence d'automatisation liée à l'utilisation du cortex préfrontal). Ainsi, la saillance qui caractérise le stimulus aurait deux origines. La première serait déterminée par l'intensité sensorielle, par exemple, taille, luminosité, ou un mouvement soudain et imprévisible [45]; l'hypermensibilité sensorielle des TSA accroît donc cette saillance [48–50]. La deuxième origine serait la suivante. En effet, la saillance dépend aussi du contraste constitué par la détection de non-familiarité.

Conclusion

Nous pourrions faire la conclusion que la personne TSA reste dans un processus réactif mettant en jeu un feed-back perceptif continu [51, 52]. Elle n'intègre pas le flux dynamique continu mais décompose les informations de manière locale et statique et utilise de ce fait des stratégies réactives compensatoires de discrimination telles qu'elles ont été décrites dans la carte cognitive parallèle [46]. Elle ne dépasse jamais la période critique au sens biologique du terme, pour l'acquisition de la manipulation des points de vue, de l'anticipation dans des tâches de navigation mais aussi pour les relations sociales et de la tolérance. De notre point de vue, la combinaison des troubles dits «moteurs» et des troubles dits «cognitifs» est incontournable et l'exemple de la personne TSA en est une illustration.

Il n'en reste pas moins que c'est un extraordinaire exemple de principe «*simplexe*» décrit par Berthoz [2] qui permet à la personne TSA de trouver des solutions efficaces et compensatoires à ses problèmes d'adaptation. Il s'agit d'une formidable anticipation pour compenser l'absence de flexibilité dans la manipulation des référentiels spatiaux complexes liés au contexte.

Références

La liste complète et numérotée des références est disponible en annexe de l'article en ligne sur www.sanp.ch.

Correspondance:
Fabienne Giuliani, PhD
Consultation of liaison
psychiatry for mental
retardation
Department of Psychiatry
CHUV
CH-1008 Lausanne
[fabienne.giuliani\[at\]chuv.ch](mailto:fabienne.giuliani[at]chuv.ch)

Literatur

- 1 Berthoz A. Anticipation et prédiction. Paris: Odile Jacob, 2015.
- 2 Berthoz A. La simplicité. Paris: Odile Jacob, 2009.
- 3 Berthoz A. Le sens du mouvement. Paris: Odile Jacob, 2013.
- 4 Berthoz A. La décision. Paris: Odile Jacob, 2013.
- 5 Berthoz A. La vicariance. Paris: Odile Jacob, 2013.
- 6 Adams RA, Shipp S, Friston KJ. Predictions not commands: Active inference in the motor system. *Brain Struct Funct*. 2013;218(3):611–43.
- 7 Picard F, Friston K. Predictions, perception and a sense of self. *Neurology*. 2014;83(12):1112–8.
- 8 Roesch EB, Nasuto SJ, Mark Bishop J. Emotion and anticipation in an enactive framework for cognition. *Front Psychol*. 2012;3:398.
- 9 Gepner B. Le monde va trop vite pour les personnes autistes! Hypothèses neurophysio-psychopathogéniques et implications rééducatives. *Neuropsychiatrie de l'Enfance et de l'Adolescence*. 2006;54:371–4.
- 10 Gepner B, eron F. Autism: a world changing too fast for a mis-wired brain? *Neurosci Biobehav Rev*. 2009;33(8):1227–42.
- 11 Tardif C, et al. Slowing down presentation of facial movements and vocal sounds enhances facial expression recognition and induces facial-vocal imitation in children with autism. *J Autism Dev Disord*. 2007;37(8):1469–84.
- 12 Dimiccoli M, et al. Stiola magica. A functional explanation of otolith geometry. *J Comput. Neurosci*. 2013;35(2):125–54.
- 13 Roll JP, et al. Inducing any virtual two-dimensional movement in humans by applying muscle tendon vibration. *J Neurophysiol*. 2009;101(2):816–23.
- 14 Thyron C, Roll JP. Predicting any arm movement feedback to induce three-dimensional illusory movements in humans. *J Neurophysiol*. 2010;104(2):949–59.
- 15 Land MF. Vision, eye movements, and natural behavior. *Vis Neurosci*. 2009;26(1):51–62.
- 16 Tabareau N, et al. Geometry of the superior colliculus mapping and efficient oculomotor computation. *Biol Cybern*. 2007;97(4):279–92.
- 17 Goldberg MC, et al. Evidence for Impairments in Using Static Line Drawings of Eye Gaze Cues to Orient Visual-Spatial Attention in Children with High Functioning Autism. *Journal Autism Dev Disord*. 2008;38:1405–13.
- 18 Keehn B, Joseph RM. Impaired prioritization of novel onset -stimuli in autism spectrum disorder. *J Child Psychol Psychiatr*. 2008;49(12):1296–303.
- 19 Klin A, et al. Two-year-olds with autism orient to non-social contingencies rather than biological motion. *Nature*. 2009;459:257–63.
- 20 Loth E, Gomez JC, Happé F. When seeing depends on knowing: Adults with Autism Spectrum Conditions show diminished top-down processes in the visual perception of degraded faces but not degraded objects. *Neuropsychologia*. 2009.
- 21 Norbury CF, et al. Eye-movement patterns are associated with communicative competence in autistic spectrum disorders. *J Child Psychol Psychiatr*. 2009;50(7):834–42.
- 22 Klam F, et al. Predictive elements in ocular interception and -tracking of a moving target by untrained cats. *Exp Brain Res*. 2001;139(2):233–47.
- 23 Senot P, et al. Cortical dynamics of anticipatory mechanisms in interception: A neuromagnetic study. *J Cogn Neuro*. 2008;20(10):1827–38.
- 24 Ahlfors S, et al. Spatiotemporal activity of a cortical network for processing visual motion revealed by MEG and fMRI. *J Neurophysiol*. 1999;82:2545–55.
- 25 Buchner H, et al. Fast visual evoked potential input into human area V5. *Neuroreport*. 1997;8(11):2419–22.
- 26 Day BL, Lyon IN. Voluntary modification of automatic arm evelked by motion of visual target. *Exp Brain Res*. 2000;130(2):159–68.
- 27 Ffytche D, Guy C, Zeki S. The parallel visual motion inputs into areas V1 and V5 of human cerebral cortex. *Brain*. 1995;118(Pt6):1375–94.
- 28 Falck-Ytter T. Young children with autism spectrum disorder use predictive eye movements in action observation. *Biology letters*. 2010. 11.
- 29 Freeth M, Chapman P, Ropar D. Do Gaze Cues in Complex Scenes Capture and Direct the Attention of High Functioning -Adolescents with ASD? Evidence from Eye-tracking. *J Autism Dev Disord*. 2009.
- 30 Lebranchu P, et al. Retinotopic coding of extraretinal pursuit signals in early visual cortex. *Cereb Cortex*. 2010;20(9):2172–87.
- 31 Darwin C. L'expression des émotions chez l'homme et les animaux. Paris: Rivages Poche, 2001.
- 32 Panksepp J. Affective Neuroscience. Oxford: Oxford University Press; 2004.
- 33 Blakmore SJ, Wolpert D, Frith CD. Central cancellation of self-produced tickle sensation. *Nature Neurosci*. 1998;1(7):635–40.
- 34 Giuliani F, El Korh P, Psychothérapie des personnes vivant avec le syndrome d'Asperger. *Swiss Arch Neurol Psychiatr*. 2014;165(8):298–305.
- 35 Grasso R, et al. Gaze anticipation contributes to the steering of locomotion. In: Fetter M, Misslisch H, Tweed D, eds. *Three-Dimensional Kinematics of Eye, Head, and Limb Movements*. Newark: Harwood Academic Publ., 1996. p. 337–47.
- 36 Hicheur H, Berthoz A. Head motion in humans alternating between straight and curved walking path: Combination of stabilizing and anticipatory orienting mechanisms. *Neuroscience Lett*. 2005;383(1–2):87–9.
- 37 Bernardin D, et al. Gaze anticipation during human locomotion. *Exp Brain Res*. 2012;223(1):65–78.
- 38 Bennequin D, et al. Movement timing and invariance arise from several geometries. *PLoS Comput. Biol*. 2009;5(7):1–27.
- 39 Belmonti V, Cioni G, Berthoz A. Development of anticipatory orienting strategies and trajectory formation in goal-oriented locomotion. *Exp Brain Res*. 2013;227(1):131–47.
- 40 Giuliani F, Schenk F. Vision, spatial cognition and intellectual disabilities. *Res Develop Disabil*. 2015;37:202–8.
- 41 Berthoz A. La décision. Paris: Odile Jacob; 2003.
- 42 Gomez JC. Embodying meaning: Insights from primates, autism, and Brentano. *Neural Networks*. 2009;22(Special Issue):190–6.
- 43 La Fougère C, et al. Real versus imagined locomotion: A [18F]-FDG PET-fMRI comparison. *NeuroImage*. 2010;50(4):1589–98.
- 44 Tolman EC. Cognitive maps in rats and men. *Psychological Rev*. 1948;55:189–208.
- 45 O'Keefe J, Nadel L. The hippocampus as a cognitive map. Oxford: Oxford University Press; 1978.
- 46 Jacobs LF, Schenk F. Unpacking the cognitive map: the parallel map theory of hippocampal function. *Psychol Rev*. 2003;110(2):285–315.
- 47 Berlyne DE. Conflict, arousal and curiosity. New York: McGraw-Hill; 1960. p. 350.
- 48 Bogdashina O. Sensory Perceptual Issues in Autism and Asperger Syndrome. Different sensory experiences / Different perceptual worlds. London: Jessica Kingsley; 2003.
- 49 Gomes E, Pedroso FS, Wagner MB. Auditory hypersensitivity in the autistic spectrum disorder. *Pro Fono*. 2008;20(4):279–84.
- 50 Williams D. Si on me touche, je n'existe plus. Paris: J'ai lu; 1992.
- 51 Bertholet L, et al. Spatial radial maze procedures and setups to dissociate local and distal relational spatial frameworks in humans. *J Neurosci Meth*. 2015;253(6):126–41.
- 52 Bertholet L, Schenk F. To be here or elsewhere? *Austin J Psychiatry Behav Sci*. 2015. 2(1).