

PROJET
MIMETIC

RAPPORT FINAL

**LOGICIEL POUR L'ENTRAÎNEMENT
COMBINÉ À L'INTERACTION SOCIALE
COLLABORATIVE ET À L'APPRENTISSAGE
MOTEUR DANS LE TROUBLE
DU SPECTRE DE L'AUTISME**

LIMSI-CNRS :

Jean-Claude MARTIN
Tom GIRAUD
Brian RAVENET
Elise PRIGENT
Dorine CAQUERET

Centre TEDyBEAR :

Jacqueline NADEL
Aurélie CHERRIER
Justin MALLERET

Travail réalisé par :

Un projet lauréat de l'Appel à projets
« Autisme et Nouvelles Technologies »,
coordonné par la FIRAH et soutenu par
la Fondation UEFA pour l'enfance et la Fondation Orange



Fondation





TEDyBEAR

TEDyBEAR est un ensemble de centres médico-sociaux à caractère expérimental dédiés à l'éducation de jeunes enfants avec trouble du spectre de l'autisme (TSA) âgés de 3 à 11 ans, dont la plupart sont non verbaux. Ces centres sont agréés par l'ARS d'Ile de France. L'un est implanté à Saint-Cloud, l'autre plus récent est situé à Paris.

TEDyBEAR a développé un concept pédagogique innovant fondé sur l'inclusion scolaire et la coordination avec la famille et les aidants

Dans l'objectif d'inclusion scolaire :

- > Partage du temps entre l'école et le centre
- > Coordination avec l'école : participation à l'ESS, au GEVASCO, mise en place de cahiers de liaison, de visites du centre par les enseignants et AVS, et par les thérapeutes libéraux (orthophoniste, psychomotricien, ergothérapeute).

Dans l'objectif de coordination avec la famille :

- > Cahier pédagogique remis chaque fin de semaine avec fiche hebdomadaire du/de la psychologue référent/e, courbes mensuelles des comportements positifs et négatifs,
- > Fiche hebdomadaire des éducateurs renseignant sur l'autonomie et l'adaptation sociale aux pairs ; tablette-relais journalier vers les familles montrant des clips de la journée.
- > En retour, fiche hebdomadaire remplie par les parents et renseignant sur le comportement à la maison durant la semaine

TEDyBEAR fonctionne en 1/2/3 : un enfant pour un psychologue durant les thérapies, 2 enfants pour un psychologue pour les activités pédagogiques, 3 enfants pour un éducateurs pour les activités faisant relais avec l'école dans le domaine de la socialisation.

Le travail pédagogique est de type neuro-éducation avec pour base l'exercice du cerveau social. Un focus particulier est placé sur l'imitation qui est centrale pour le développement en ce qu'elle entretient des rapports étroits avec les grandes fonctions, perception, action, langage, et constitue le support initial de la communication et de l'apprentissage.

Les thérapies sont de deux types : imitation pour développer la communication non verbale et l'apprentissage par observation, et Kinect pour développer la connaissance du corps et le calibrage de l'organisation spatiale.



LIMSI-CNRS (www.limsi.fr, BP 133, 91403 Orsay).

Le Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur est un laboratoire de recherche pluridisciplinaire qui rassemble des chercheurs relevant de différentes disciplines des Sciences de l'Ingénieur et des Sciences de l'Information ainsi que des Sciences du Vivant et des Sciences Humaines et Sociales. Administrativement, le LIMSI est une unité propre du CNRS, rattachée à l'Institut des Sciences de l'Information et de leurs Interactions du CNRS.

Les recherches en interaction homme-machine s'intéressent d'une part à analyser, comprendre et modéliser les interactions entre humains et systèmes artificiels. Le groupe CPU qui participe à ce projet se concentre sur la psychologie des interactions affectives non-verbales et collectives chez l'humain ainsi sur que la conception d'interfaces homme-machine affectives et virtuelles. Les membres du groupe sont des enseignant-chercheurs de l'Université Paris-Saclay en Informatique, Interaction Humain-Machine et en Psychologie.

Plusieurs projets concernent l'entraînement à des compétences sociales pour (enfants, adolescents et adultes ; avec ou sans pathologie) comme par exemple la conception de personnages virtuels pour l'entraînement à des entretiens d'embauche ou formation du personnel soignant à l'aide de patients virtuels. Les chercheurs participent à la définition de cadres théoriques, la conception des interactions humain-machine et leur évaluation expérimentale.

TABLE DES MATIÈRES

I	AVANT-PROPOS	5
	1.1 DIMENSION PARTICIPATIVE	
	1.2 DIMENSION APPLICATIVE	
II	RÉSUMÉ	7
III	INTRODUCTION	8
	3.1 RÉFÉRENCES	
IV	SYNTHÈSE DE LA REVUE DE LITTÉRATURE	11
	4.1 LA PERSPECTIVE DU SPÉCIALISTE DE L'AUTISME	
	4.2 LA PERSPECTIVE DES CHERCHEURS EN INFORMATIQUE ET INTERACTION HUMAIN-MACHINE	
	4.3 CONCLUSION	
	4.4 RÉFÉRENCES	
V	LA MÉTHODOLOGIE DU PROJET	28
	5.1 EXPOSÉ DE LA MÉTHODE	
	5.2 PRÉSENTATION DE LA MOBILISATION DES CHERCHEURS ET DES ACTEURS DE TERRAIN POUR PARTICIPER À LA RECHERCHE	
	5.3 EXPOSÉ DU TRAITEMENT DES RÉSULTATS	
	5.4 RECOMMANDATIONS AU REGARD DES RÉSULTATS	
VI	PRÉSENTATION DÉTAILLÉE DES SUPPORTS D'APPLICATION DÉVELOPPÉS AU REGARD DES RÉSULTATS ET DES RECOMMANDATIONS	54
VII	ÉVALUATION	56
VIII	CONCLUSION	58
IX	ANNEXE	58

I - AVANT-PROPOS

1.1 - DIMENSION PARTICIPATIVE

La dimension participative de la recherche réalisée a été très élevée. En effet la rédaction initiale du projet s'est faite en étroite collaboration entre Jean-Claude Martin, professeur en informatique. Interaction Humain-Machine et responsable de l'équipe pluridisciplinaire « Cognition Perception Usages » du LIMSI CNRS, porteur du projet, et Jacqueline Nadel, directrice de recherche CNRS émérite spécialiste de l'autisme et actrice de terrain en tant que directrice scientifique du centre médico-social TEDyBEAR.

Dès le projet accepté, les échanges ont été quasi permanents entre l'équipe de Jean-Claude Martin au LIMSI-CNRS et l'équipe de terrain de Jacqueline Nadel à TEDyBEAR. Nous avons ensemble fixé les limites du projet. Ces limites étaient liées d'une part aux contraintes techniques de la construction d'une plate-forme virtuelle et d'autres part aux contraintes humaines spécifiques référées au trouble du spectre de l'autisme (TSA). Rappelons que le trouble du spectre de l'autisme est un trouble neurodéveloppemental qui se caractérise par des difficultés profondes à interagir et communiquer avec l'environnement social et par des intérêts restreints et des anomalies sensorielles (APA, 2013). Le trouble du spectre de l'autisme varie en intensité de sévère à léger. Cinquante pourcents de ces personnes au moins ont une déficience mentale associée et/ou sont non verbales.

Les informaticiens expliquaient ce qu'ils pouvaient faire et pas faire dans les limites spatiales d'une plate-forme destinée à être installée dans une salle que les acteurs de terrain voulaient de taille modeste pour éviter l'éparpillement de l'attention des enfants porteurs de TSA. Les psychologues acteurs de terrain se demandaient comment analyser la collaboration motrice avec l'avatar puisque pour des raisons éthiques on ne pouvait pas filmer les enfants. Après étude du problème, les informaticiens ont trouvé une réponse : au lieu d'enregistrer les mouvements réels, on enregistrerait le trajet de ces mouvements via les objets déplacés, ce qui décrit leur orientation et leur vitesse. Les psychologues renseignaient les informaticiens sur les spécificités de l'autisme pour éviter les crises devant la plate-forme : on ajoutait ou supprimait des éléments dans une conversation interdisciplinaire. Ainsi, les informaticiens proposaient d'ajouter des indices d'erreurs ou de réussites, les psychologues expliquaient que ces indices ne seraient pas une aide mais un perturbateur d'attention, etc. Les informaticiens étaient très sensibles

à la fois aux spécificités des enfants et aux besoins des professionnels. Ces besoins étaient de ne pas être envahis par trop de contraintes techniques dans l'utilisation de la plate-forme de façon à rester disponibles pour les enfants. Bref il s'est agi sans cesse d'un dialogue où chaque discipline avait besoin de l'autre pour trouver la réponse.

1.2 - DIMENSION APPLICATIVE

Les résultats de notre suivi d'enfants sur de nombreuses séances nous ont montré les bénéfices que l'on pouvait tirer d'une analyse précise de leurs performances motrices. Nous avons ainsi dégagé 4 paramètres : le contrôle du geste, l'ajustement du trajet au trajet de l'avatar, la synchronie avec l'avatar, la compréhension de l'intention motrice de l'avatar. Nous avons remarqué aussi que certains enfants cherchaient à contourner la plate-forme ou se mettaient à plat-ventre pour regarder en-dessous, à la recherche du personnage virtuel dont ils avaient fait une personne avec des motifs propres, un véritable agent.

Ceci nous a amené à organiser des thérapies à *la carte*. Selon les enfants, il s'agit par exemple de développer la capacité à prendre en compte la posture de l'avatar comme un indice de son but (il va vers la table, il va prendre la boîte...) et d'entraîner ainsi l'accès à l'attention conjointe, ou d'arriver à un contrôle du geste faisant adhérer l'objet réel à l'objet virtuel, ou d'arriver à se synchroniser sur la vitesse de l'avatar, etc. La flexibilité du dispositif et son caractère ludique nous permettent d'accéder à une vraie dimension applicative.

Mais évidemment, pour des professionnels de terrain qui n'ont pas participé au programme de recherche, l'intérêt des résultats et livrables est déjà celui de l'applicabilité : le dispositif est performant et simple à manœuvrer, comme nous avons pu le constater en passant la main à un éducateur remplaçant le directeur pédagogique.

Il est encore trop tôt pour évaluer l'impact public de notre plate-forme, mais nous pouvons considérer les réactions des professionnels de TEDyBEAR qui n'ont pas participé à la recherche. Ces réactions concernent le caractère généralisable de nos résultats. En effet nos collègues ont été impressionnés de constater combien ils reconnaissaient les caractéristiques motrices des enfants dans leurs résultats à la plate-forme : impulsivité motrice, lenteur de mise en route, imprécision des mouvements, tout ce qui ressortait des résultats de chacun représentait des constats faits dans d'autres types d'activités. Cela nous a conforté dans notre recherche d'une *signature motrice* révélée par les performances aux paramètres principaux du mouvement collaboratif, et destinée à faire l'objet d'un article scientifique en cours d'élaboration.

II - RÉSUMÉ

Les nouvelles technologies appliquées à l'autisme privilégient l'entraînement aux compétences sociales ou l'entraînement aux compétences motrices, mais jamais la conjonction des deux. Plus encore, elles se sont majoritairement adressées à des enfants verbaux présentant un autisme léger, négligeant la majeure partie des cas d'autisme, en particulier les cas des enfants non verbaux, qui n'ont pas accès à l'inclusion par le langage et les symboles. Quel que soit le niveau de l'enfant, apprendre l'entraide par le moyen de tâches de collaboration motrice a pourtant une importance majeure pour l'inclusion citoyenne, scolaire et sportive, et pour la participation aux activités de la vie quotidienne (déplacer une table à deux, porter un panier très lourd, faire du canoë-kayak à deux...). L'entraînement à des *actions motrices collaboratives* devrait avoir un impact fort à la fois sur les réalisations motrices et sur les interactions sociales. En effet ces actions nécessitent un dialogue moteur, c'est-à-dire une prise en compte du mouvement de l'autre dans son propre mouvement. Une telle prise en compte introduit à l'interaction sociale tout autant qu'elle introduit à la synchronie motrice.

La réalisation du dispositif de collaboration motrice a compris 4 phases. La phase technique a pris en compte les réalisations existantes en intégrant des logiciels déjà disponibles, libres et/ou gratuits (Unity, Blender, Pictogram Room) donc facilement réutilisables, et les a adaptés à l'objectif. La deuxième phase a concerné l'adaptation du système technique aux spécificités de l'autisme. Le programme développé a été conçu par les spécialistes de l'autisme membres de l'équipe et évalué par les professionnels de terrain de l'équipe, en étroite collaboration avec des collègues diagnostiqués, des référents d'associations de parents, et des familles d'enfants avec TSA. Elle a abouti à la réalisation d'un système composé d'un personnage virtuel projeté sur une surface sur laquelle un objet tangible est magnétisé : l'utilisateur et le personnage virtuel tiennent tous deux une partie de l'objet, mi-tangible pour l'enfant et mi-virtuel pour l'avatar, simulant ainsi une action collaborative. L'un des avatars suit l'enfant mais l'autre est autonome et requiert que l'enfant s'adapte à la direction et la vitesse de son déplacement. Les paramètres de quantification automatique des succès et des échecs, et de la précision et de la synchronie des déplacements ont été conçus à ce stade. La troisième phase a répondu à la nécessité de vérifier l'ergonomie du dispositif pour de jeunes enfants et de concevoir son adaptabilité à différentes tailles et différentes statures de jeunes. Cette phase a fait appel à 10 enfants tout-venants dans l'objectif de préparer le système pour une population d'enfants porteurs de TSA. La quatrième phase a été celle de l'évaluation du système par l'entraînement de 10 enfants avec TSA modéré

à sévère, peu ou pas du tout verbaux. L'entraînement a compris 3 étapes : une étape de familiarisation avec le dispositif, une étape d'apprentissage de l'adhérence entre l'objet tangible et l'objet réel de l'avatar suiveur, et une étape d'entraînement à se synchroniser avec l'avatar autonome variant sa vitesse et l'orientation de ses déplacements.

Les premiers résultats montrent un avantage de la compréhension verbale pour l'étape de la familiarisation. En revanche le fait que la meilleure réussite de synchronisation avec l'avatar autonome soit le fait d'un enfant non verbal indique l'accessibilité du dispositif et son efficacité dans une population largement laissée pour compte par les nouvelles technologies. Le traitement des 744 scénarios relevés automatiquement en termes de logs des écarts temporels et spatiaux entre déplacements virtuels et réels vise à analyser les deux conditions nécessaires pour faire quelque chose ensemble : aller au même rythme et suivre le même itinéraire.

Mots-clés : Autisme, collaboration motrice, système virtuel et tangible d'interaction, enfants non verbaux

III - INTRODUCTION

Beaucoup de situations d'interaction avec des objets physiques sollicitent la collaboration avec quelqu'un d'autre : un objet trop lourd pour le porter seul, un objet trop grand pour le tenir des deux mains, un objet trop glissant pour le retenir des deux bras, un matériel trop compliqué pour être manipulé seul... Comme ces situations impliquent l'autre, on peut se demander de quoi les enfants avec Trouble du Spectre de l'Autisme (TSA) sont capables dans ce domaine, eux dont les symptômes cardinaux sont les dysfonctionnements de l'interaction sociale et de la communication (APA, 2013). Nos questionnaires remplis par les familles indiquent que ces enfants n'aident pas spontanément et que les parents ne leur demandent pas de collaborer, en partie parce qu'ils pensent que leurs enfants n'en seraient pas capables, et en partie parce que ce serait trop long et trop compliqué à obtenir.

On peut faire l'hypothèse que développer cette forme concrète de collaboration peut améliorer les relations sociales en même temps que les capacités motrices. Les psychologues du développement ont d'ailleurs depuis longtemps montré que la motricité est la première base des interactions sociales (McDonald, Lord & Ulrich., 2013). Cette question est d'autant plus intéressante qu'aider l'autre physiquement ne nécessite pas de se parler, et donc qu'une situation de collaboration motrice peut inclure des personnes non verbales. Or il se trouve que jusqu'à présent les

systèmes interactifs ont laissé pour compte la vaste population des enfants porteurs d'un autisme sévère avec une déficience intellectuelle associée, et sans langage oral. Notre approche vise à contribuer à faire bénéficier cette population défavorisée des possibilités offertes par la réalité virtuelle ou augmentée. Mais comment ?

L'addition de deux motricités individuelles ne suffit pas pour réussir une collaboration motrice. Il faut se coordonner. Ainsi, on peut lacer ses chaussures à deux ou les lacer tout seul. Les deux cas impliquent une coordination motrice, mais de niveau différent. Lorsque l'on pratique le laçage tout seul, ce sont nos deux mains qui se coordonnent en interne, tandis que si l'on lace à deux, il faut coordonner notre main avec la main de l'autre. Ce n'est pas sans poser des problèmes : le partenaire peut avoir des mouvements plus rapides ou plus lents que les nôtres, il peut vouloir croiser le lacet tandis que nous voulons un laçage droit, il peut commencer à faire une boucle simple alors que nous cherchons à réaliser une boucle double. Décidément pour lacer ses chaussures à deux il faut se mettre d'accord avec le partenaire, synchroniser nos rythmes, avoir un plan d'action. Ces compétences sont des variables dyadiques c'est-à-dire qu'elles s'expriment dans le cadre d'un système dynamique constitué par deux personnes (Nadel & Camaioni, 1993 ; de Jaegher & Di Paolo, 2007.) Lorsque des individus s'ajustent pour réaliser une action à deux, les capacités sociales et motrices sont en jeu de façon indissociable.

Notre dispositif interactif devait prendre en compte ce point-clé dans sa conception. Les mouvements à réaliser devaient avoir un objectif commun pour entraîner à prendre en compte le mouvement de l'autre, et devaient être réalisés en partenariat social : un enfant avec un personnage virtuel qui applique un protocole. Deux personnages virtuels permettent deux protocoles distincts d'entraînement : l'un des avatars se conforme à la vitesse et à la trajectoire du mouvement de l'enfant qui doit faire en sorte que l'avatar le suive, tandis que l'enfant doit se conformer à la vitesse et à la trajectoire du mouvement de l'autre avatar. Nous verrons avec la revue de la littérature que le choix des protocoles des avatars se réfère à la définition de ce qu'est une collaboration motrice, par distinction d'autres actions conjointes qui ne nécessitent pas les mêmes compétences. Nous verrons dans la partie 'méthode' comment a pu être résolu le délicat problème de la notion de présence, inhérent à la réalité virtuelle : comment donner l'impression de déplacer un objet réel lourd alors qu'une partie est virtuelle, comment animer le personnage pour qu'il soit compris comme un agent intentionnel. Ces problèmes psychologiques devaient être résolus techniquement de façon à réaliser une présentation minimaliste répondant aux spécificités autistiques. Les techniques et dispositifs existants les plus

récents comme les exergames utilisant la caméra de profondeur Kinect pour capter le mouvement, YouMove pour éditer la capture du mouvement (Anderson, Grossman, Matejka, & Fitzmaurice, 2013), le logiciel Pictogram Room pour l'interaction avec un avatar (Herrera et al.), l'animation d'avatars (Martin, 2018), les tables interactives pour la tangibilité (Hornecker, E., & Buur, J., 2006) ont inspiré la création d'une plate-forme mixte virtuelle et tangible répondant à un objectif jamais recherché jusqu'alors : entraîner une population hétérogène de TSA, en essayant d'inclure un maximum de personnes non verbales, à une collaboration motrice généralisable aux situations de la vie quotidienne.

3.1 - RÉFÉRENCES

- American Psychiatric Association (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders* (5th edition). Washington, DC : Authors.
- Anderson, F., Grossman, T., Matejka, J., & Fitzmaurice, G. (2013). YouMove: Enhancing Movement Training with an Augmented Reality Mirror. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (p. 311–320). New York, NY, USA: ACM.
- Herrera, G., Casas, X., Sevilla, J., Rosa, L., Pardo, C., Plaza, J., Le Groux, S. (2012). Pictogram room: Natural interaction technologies to aid in the development of children with autism. *Annuary of Clinical and Health Psychology*, 8, 39-44.
- Hornecker, E., & Buur, J. (2006). Getting a Grip on Tangible Interaction: A Framework on Physical Space and Social Interaction. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (p. 437–446). New York, NY, USA: ACM.
- De Jaegher, H., & Di Paolo, E. (2007). Participatory sense-making. *Phenomenology and the cognitive sciences*, 6, 485-507.
- McDonald, M.M., Lord, C., & Ulrich, D. (2013). The relationships of motor skills and social communicative skills in school-aged children with autism spectrum disorder. *Adapted Physical Activity Quarterly*, 30, 3, 271-282.
- Nadel J. et Camaioni L. (1993). *New Perspectives in Early Communicative Development*. Londres : Routledge.
- Staiano, A. E., & Calvert, S. L. (2011). Exergames for Physical Education Courses: Physical, Social, and Cognitive Benefits. *Child development perspectives*, 5(2), 93-98.

IV - SYNTHÈSE DE LA REVUE DE LITTÉRATURE

4.1 - LA PERSPECTIVE DU SPÉCIALISTE DE L'AUTISME

4.1.1 - Les concepts ou mots clés

Plusieurs termes peuvent être utilisés pour décrire les situations d'action motrice à deux: coordination motrice, activité conjointe, interaction motrice, coopération motrice et collaboration motrice. Lorsqu'il s'agit de désigner la situation ou le type de tâche, le terme le plus utilisé en anglais est celui de 'joint action', que nous traduirons en français par action conjointe ou action à deux. Lorsqu'il s'agit de décrire les capacités impliquées, le terme de coordination motrice est le plus général, les autres termes servant dans les meilleurs cas à spécifier le type de coordination dont il s'agit. Parfois pourtant les différents termes peuvent être employés dans un même article comme synonymes. Une question se pose alors : Y-a-t-il une différence dans les capacités motrices et sociales à développer selon que l'on parle de collaboration ou de coopération motrice par exemple ? Les dispositifs créés par les chercheurs peuvent nous aider à comprendre pourquoi ils parlent de coopération plutôt que de collaboration ou d'interaction motrice plutôt que d'action conjointe.

La coordination motrice étant le mot-clé le plus général incluant tous les autres, nous analyserons les capacités impliquées dans ce cadre, en les spécifiant au type d'action à deux. En effet, ce terme de coordination motrice concerne aussi bien une activité solitaire qu'une activité à deux. On peut lacer ses chaussures à deux ou les lacer tout seul. Les deux cas impliquent une coordination motrice, mais de niveau différent. Lorsque l'on pratique le laçage tout seul, ce sont nos deux mains qui se coordonnent en interne, tandis que si l'on lace à deux, il faut coordonner notre main avec la main de l'autre. Ce n'est pas sans poser des problèmes : le partenaire peut avoir des mouvements plus rapides ou plus lents que les nôtres, il peut vouloir croiser le lacet tandis que nous voulons un laçage droit, il peut commencer à faire une boucle simple alors que nous cherchons à réaliser une boucle double. Décidément pour lacer ses chaussures à deux il faut se mettre d'accord avec le partenaire, synchroniser nos rythmes, avoir un plan d'action. Ces compétences sont des variables dyadiques c'est-à-dire qu'elles s'expriment dans le cadre d'un système dynamique constitué par deux personnes. Nous sommes dans une situation sociale. Mais pour réaliser une coordination motrice à deux, encore faut-il déjà être capable de coordination motrice individuelle.

4.1.2 - La coordination motrice individuelle

Une méta-analyse de 51 études nous présente un état des lieux (Fournier, Hass, Naik, Lodha et Cauraugh, 2010). Ces 51 études évaluent toutes la stabilité posturale, l'équilibre, la marche et les mouvements des bras dans des groupes ayant reçu le diagnostic d'autisme comparés à des groupes typiques sans atteinte neurologique. L'analyse ainsi réalisée s'étend de l'âge de 18 mois à 33 ans. Elle rassemble un effectif de 1238 personnes avec autisme appariées sur l'âge chronologique à 3017 personnes typiques. Les résultats montrent clairement que les atteintes posturo-motrices sont un symptôme cardinal de l'autisme, quel que soit le niveau cognitif des personnes. Prolongeant ces résultats, une étude mesurant la stabilité posturale d'enfants avec TSA de 3 à 16 ans montre qu'un système postural immature est un facteur limitant l'émergence des autres capacités motrices surtout lorsqu'il s'agit d'activités dirigées vers un but (Radonovich, Fournier & Hass, 2013). Ces données nous font entrevoir que de telles difficultés au niveau individuel sont encore plus sensibles dans une action motrice à deux. Dans ce cadre, un élément essentiel d'une motricité dirigée vers un but doit être prise en compte : la connaissance de son corps. Si l'enfant ne fait pas le lien entre ce qu'il se sent faire et ce qu'il voit, quelle coordination motrice à deux peut-on espérer ? Nous dépistons ce type de déficit en utilisant la plate-forme Kinect (Nadel & Poli, 2018). Kinect est une caméra capteur de mouvements. L'enfant se voit sur écran sans inversion d'image. Certains enfants non verbaux avec autisme sévère ne sont nullement intéressés par ce double en deux dimensions qui fait les mêmes mouvements qu'eux en synchronie. Cette condition basique de la coordination motrice à deux ne doit pas être oubliée, et nous en ferons un critère à tester dans l'étude.

4.1.3 - Les composantes sociales de la coordination motrice interindividuelle

A. L'aptitude à suivre la direction du regard de l'autre

L'aptitude à suivre la direction du regard de l'autre permet l'attention conjointe qui joue un rôle important dans l'action conjointe (Sebanz, Bekkering, & Knoblich, 2006). Cette compétence sociale entre en jeu dans les tâches motrices à deux en tant qu'elle concerne la convergence visuelle sur une cible. Il faut constater la rareté de recherches étudiant la relation entre attention conjointe et activité conjointe dans l'autisme. Ce n'est pas sans rapport avec la démonstration consensuelle d'un déficit en attention conjointe dans l'autisme (Baird et al., 2000 ; Baron-Cohen, Allen, & Gillberg, 1992 ; Mundy, Sigman, & Kasari, 1990). S'il est difficile de suivre le regard

de l'autre et de rencontrer son intérêt pour une cible, l'action motrice à deux est sans doute rendue plus incertaine. Une étude de corrélation entre performance coopérative d'enfants avec TSA et attention conjointe montre une relation significative entre les deux capacités, et met en question l'idée d'une impossibilité de coopération si l'on ne comprend pas l'intention de l'action (Colombi et al., 2009).

B. L'aptitude à planifier un mouvement en fonction du mouvement de l'autre

Pour réussir une action motrice à deux, il convient d'intégrer les caractéristiques des mouvements du partenaire dans sa propre planification du mouvement. Plusieurs études ont abordé ce problème. Citons d'abord celle de Rosenbaum et Jorgensen qui prennent pour option le fait que les mouvements sont planifiés de façon à être réalisés avec le maximum d'aisance et de stabilité dans la posture finale (Rosenbaum & Jorgensen, 1992). Ainsi faciliter le geste du partenaire en anticipant sa planification motrice doit être un élément important de la collaboration motrice. Gonzalez, Glazebrook, Studenka, & Lyons (2013) typically developing (TD) utilisent ce paradigme de la position de départ pour étudier les capacités de planification dans l'autisme. Les participants doivent d'abord prendre, utiliser ou poser trois objets plus ou moins fixés dans leur fonction (dont un petit marteau). Ensuite ils doivent passer ces objets à un partenaire qui les posera ou les utilisera. Les résultats montrent que la planification du mouvement pour passer l'objet n'aboutit pas systématiquement à une posture confortable pour le partenaire, et donc qu'il n'y a pas une anticipation stable de la planification motrice du partenaire chez les participants autistes. Notons que ce type de tâche implique d'être capable de se décentrer et prendre la perspective de l'autre, en imaginant être physiquement à sa place. Par ailleurs il faut comprendre que l'autre va devoir réaliser sa part de l'action sur la base et en continuité de celle réalisée par soi. Le but final est la résultante de l'association de deux sous-buts différents : le premier sous-but est de tendre l'outil dans une position adaptée au sous-but du partenaire qui est de prendre l'outil dans la bonne orientation. Il y a deux rôles différents avec des objectifs différents tendant vers un objectif final commun qui est de réaliser une action affordable avec l'objet. La coordination motrice suppose ici une complémentarité de deux actions différentes successives dont il faut imaginer la planification d'ensemble. Il en ressort l'idée que la coordination motrice interindividuelle peut exiger une planification plus importante dans le cas où elle concerne 2 actions motrices différentes et successives représentant deux rôles distribués entre les partenaires dont il faut interpréter l'intention (Colombi et al., 2009). Ces

cas sont considérés comme des cas de coopération. En revanche, lorsque les mouvements sont similaires et simultanés, comme pousser ensemble un meuble d'une pièce dans une autre, les sous-buts sont les mêmes pour réaliser le but final dont chacun est responsable au même titre : la planification est beaucoup plus simple et l'on parle alors de collaboration.

Pour rendre plus claire la distinction entre coopération et collaboration motrice, il peut être intéressant de se référer au cadre théorique issu de la théorie des systèmes dynamiques et appelé « coopération incarnée » (*embodied cooperation*). Dans la perspective dynamique, les contraintes motrices sont les mêmes, seul ou à deux, car ce sont les contraintes anatomiques. Pourtant les performances diffèrent, car à deux de nouvelles possibilités émergent (Schmidt & Richardson, 2008). Le paradigme de la coopération incarnée s'est créé sur la base de l'idée que les mouvements d'un autre étendent les possibilités d'action d'un individu. La coopération dans une action à deux est vue comme un système moteur unique avec de nouvelles capacités de synergie sociale ((Richardson, & Schmidt, 2009). Richardson et ses co-auteurs (Richardson et al., 2015) voient la synchronie corporelle et l'action coopérative comme une réalité sociale dyadique basée sur des patterns moteurs similaires ou complémentaires. L'utilisation de mouvements rythmiques simples permet d'examiner la dynamique de la coordination interpersonnelle, en phase ou en antiphase (Kelso, 1995). Il y a des patterns dynamiques inclus dans l'action conjointe qui sont compétitifs, c'est-à-dire en antiphase. Dans ce cas l'objectif est individuel. C'est la différence avec les actions conjointes collaboratives qui ont un objectif commun. Une étude en hyperscanning illustre bien l'effet cérébral d'une communauté d'objectif. Les mêmes duos sont soumis à deux types de procédure soit coopérative, soit compétitive. Dans la situation coopérative, ils doivent presser chacun une clé à un signal visuel. Si leurs réponses sont simultanées, ils reçoivent un point, si elles sont décalées, ils perdent un point : l'objectif commun est de gagner des points. Dans la situation compétitive, il s'agit de répondre plus vite que son partenaire pour gagner un point alors que l'autre perd un point : l'objectif est clairement individuel. L'intéressant résultat est que seule la situation de coopération induit une cohérence entre les cortex frontaux supérieurs des deux personnes engagées dans l'action : c'est donc l'objectif commun qui rassemble les partenaires au niveau de l'organisation cérébrale (Cui, Bryant & Reiss, 2011).

L'idée que les effecteurs du corps s'autoorganisent selon la dynamique du mouvement et sont contraints à la fois par les données anatomiques et ce qu'offre l'environnement, mène à l'hypothèse d'une similitude comportementale spontanée entre participants lors d'une action motrice à deux. Ceci conduit à analyser en particulier les situations de synchronie et de similitude.

C. Similitude et synchronie : l'aptitude à coupler la perception de l'action de l'autre et sa propre action

Le neuro-mimétisme théorisé via les neurones miroir (Rizzolatti & Craighero, 2004) a fait progresser l'intérêt pour les bases sociales de la motricité en montrant la relation cérébrale entre observer quelqu'un faire une action et réaliser soi-même cette action (Decety & Grèzes, 1999). Cependant la référence à l'autre induite par l'observation de l'action reste interne à l'individu. Il faut que le couplage perception-action soit conjoint pour mettre en correspondance ses mouvements dans l'action motrice à deux. Couplage perception-action croisé, c'est-à-dire que chacun se voit faire les mêmes actions que l'autre, pour qu'il y ait effet social direct du système miroir : l'imitation immédiate peut être considérée comme une *motricité partagée* (Nadel, 2016). En effet, la similitude et la synchronisation des actions réalisées supposent l'adaptation de sa motricité à la motricité de l'autre et donnent les moyens de former des représentations motrices communes avec autrui (Jeannerod, 2001).

L'idée que l'imitation synchrone est la plus élémentaire situation de connexion socio-émotionnelle est attestée par des études portant aussi bien sur les adultes typiques (Chartrand & Bargh, 1999), sur des enfants préverbaux typiques (Nadel & Baudonnière, 1982), que sur des enfants avec TSA (Nadel, 2016). Elle offre les conditions sous lesquelles un individu est au mieux capable de coordonner ses mouvements avec ceux d'un autre. Richardson et ses co-auteurs la décrivent comme partie intégrante de la coopération incarnée, dans une définition assez globale de la coopération : une coopération incarnée, disent-ils, implique que 'deux personnes parviennent à une unité d'action qui intègre les participants et l'objet commun' (Richardson et al., 2015). Cette unité d'action est d'autant plus simple à réaliser que l'on fait la même chose en même temps. Une connexion minimale se concrétise par la synchronie corporelle. De pair avec l'imitation s'organise spontanément la synchronie : elle s'exprime au niveau cérébral par des synchronisations du rythme alpha mu dans la zone centro-pariétale du système miroir des deux partenaires durant une situation d'imitation (Dumas, Nadel, Soussignan, Martinerie & Garnero, 2010). La littérature montre que la synchronie interpersonnelle procure une base essentielle pour l'interaction sociale. Elle augmente l'affiliation sociale (Hove & Risert, 2009). D'ailleurs elle a un effet cérébral similaire à une bouffée d'ocytocine, l'hormone de l'attachement, dans le cas d'autisme (Delaveau, Arzounian, Rotgé, Nadel, & Fossati, 2015). Ainsi peut-on envisager les liens entre la réalisation d'une action motrice et le développement de l'interaction sociale positive. Plusieurs recherches utilisent l'imitation synchrone comme un paradigme permettant d'évaluer les effets de la

similitude et de la synchronisation dans la motricité collaborative. Les situations dans lesquelles un dialogue moteur est nécessaire, comme tirer à chaque bout d'un cylindre pour qu'il s'ouvre, ou porter ensemble une bassine, demandent plus d'articulation entre les mouvements des deux partenaires. Nous les avons appelées collaboratives, pour les distinguer des situations où la coordination implique des mouvements différents mais complémentaires, synchrones ou successifs, plus souvent nommées situations coopératives. C'est le choix de procédure auquel nous conduit le présent examen de la littérature.

4.2 - LA PERSPECTIVE DES CHERCHEURS EN INFORMATIQUE ET INTERACTION HUMAIN-MACHINE

Comme on l'a dit dans l'avant-propos, les nouvelles technologies se sont concentrées sur l'entraînement aux compétences sociales ou sur l'entraînement aux compétences motrices mais pas sur l'entraînement combiné de ces deux aspects majeurs du développement. Il n'en reste pas moins que la revue des techniques utilisées pour aborder l'un ou l'autre de ces entraînements nous est utile pour rassembler l'existant comme base de la conception d'un système interactif mixte virtuel et tangible de collaboration motrice.

4.2.1 - Les dispositifs humain-machine pour l'action motrice à deux

Un certain nombre de courants de l'Interaction Humain-Machine s'intéressent aux interactions sociales, et plus particulièrement aux interactions dyadiques. Les interactions supportées par ces dispositifs peuvent prendre de multiples formes, synchrones ou asynchrones, chaotiques ou structurées, ponctuelles ou prolongées. Dans ce projet, nous nous intéressons aux interactions synchrones et dynamiques, c'est-à-dire qui impliquent le mouvement des deux personnes de la dyade en même temps. Conçu tantôt pour étudier et comprendre les interactions sociales, tantôt pour entraîner les compétences sociales, le point commun des différents dispositifs décrits dans cette section est qu'ils réduisent la complexité de l'interaction dyadique afin de la rendre appréhendable par des enfants avec TSA.

1. L'interaction tangible et tactile pour la collaboration

1.1 Favoriser l'interaction sociale avec les TUI (Tangible UserInterface)

L'interaction tangible (parfois appelé « interface attrapable ») consiste à équiper d'informatique un objet réel comme un jouet, afin qu'il puisse être utilisé, par exemple par des personnes avec TSA interagissant avec un ordinateur via cet objet (Fitzmaurice, Ishii, & Buxton, 1995). La physicalité de ce type d'interface en fait un outil particulièrement pertinent pour les contextes sociaux et collaboratifs, permettant notamment l'engagement du corps et le partage des contrôleurs (Hornecker & Buur, 2006). Pour les enfants, ces interfaces sont particulièrement ludiques et facilitent les interactions en groupe de par les multiples points d'accès qu'elles procurent (aussi bien dans la manière d'interagir avec un objet que dans l'interprétation subjective de cette interaction ; Fernaeus, Tholander, & Jonsson, 2008).

Dans le domaine de l'autisme chez l'enfant, des thérapies basées sur les activités de jeux en groupe se développent comme par exemple avec l'utilisation de LEGOs (Legoff & Sherman, 2006). Ce type d'activité est particulièrement intéressant pour travailler la communication verbale et non verbale, l'attention conjointe, la résolution de problème collaborative et les mécanismes de tour de rôle. Surtout, l'activité est bien acceptée par les enfants car elle se base sur des jeux à manipuler issus de la vie de tous les jours.

1.2 Les tables interactives et les environnements virtuels pour la collaboration

Contrairement aux interfaces tangibles, les dispositifs de collaboration décrits dans cette section sont des applications entièrement digitales accessibles via un écran. Gal et al. (2009) développent la StoryTable, où des dyades d'enfants avec TSA sont impliquées dans la narration collaborative d'une histoire. Les enfants doivent choisir ensemble les éléments de l'histoire tels que le personnage et le fond d'écran. Certaines actions ne peuvent être faites que par un enfant alors que d'autres doivent être faites de manière conjointe, par exemple pour la sélection du fond d'écran (i.e., le bouton doit être touché à deux). Cette contrainte du « toucher ensemble » est un exemple de ce que Battocchi et al. (2010) appellent le paradigme de la collaboration forcée. Ces derniers proposent une tâche de puzzle collaboratif, tâche plus accessible aux enfants avec TSA car elle s'appuie sur des compétences visuo-spatiales. Une dyade d'enfants avec TSA doit réaliser un puzzle de 16 pièces via une série de gestes coopératifs : toucher ensemble, déplacer ensemble, lâcher ensemble. Un feedback sonore indique si l'action conjointe est correcte ou non. Dans l'objectif de s'intégrer dans une thérapie cognitive comportementale, Giusti, Zancanaro, Gal, & Weiss (2011) conçoivent une série de mini-jeux pour développer trois dimensions de la collaboration : l'action conjointe, le partage de ressources et la planification mutuelle. Pour

l'action conjointe, les deux enfants doivent déplacer ensemble un panier sous des arbres pour réceptionner des pommes qui tombent : il s'agit donc de collaboration motrice vraie au sens que chacun doit prendre en compte le mouvement de l'autre. La difficulté peut varier fonction du nombre de pommes qui tombent et de leur distance au sol. Une autre version du jeu implémente des rôles différents pour chaque enfant : un des enfants touche des étoiles pour les faire tomber tandis que l'autre déplace le panier pour les réceptionner : il s'agit donc de rôles complémentaires qui implique une planification à deux et une coopération mais des mouvements indépendants (cf. supra la distinction des concepts).

Dans l'application CoMove (Zhang et al., 2018), la dyade d'enfants avec TSA doit réaliser un tangram (puzzle de sept pièces formant un carré). Trois modes sont implémentés : jeu à tour de rôle où chaque enfant fait une action à tour de rôle, jeu de partage d'informations où un des enfants n'a pas les couleurs des pièces et doit donc échanger avec son partenaire, et le jeu de collaboration où les enfants doivent bouger les pièces simultanément. Un enregistrement de données quantitatives est réalisé : temps de début et de fin du jeu, fréquence des succès, informations de déplacement des pièces et données audio des communications verbales. Les mesures de progression des enfants présentées dans cet article sont essentiellement basées sur une annotation a posteriori de la communication verbale (e.g., nombre de questions, nombre de renforcements positifs).

Au travers de ces projets, il ressort l'importance de bien décomposer ce qui fait la collaboration pour mieux ajuster le niveau de complexité de la tâche. Les modèles derrière ces décompositions restent cependant arbitraires et un meilleur ancrage théorique permettrait une meilleure articulation avec les thérapies existantes. On retrouve aussi le rôle central du praticien qui doit pouvoir réguler l'interaction ainsi que collecter des données en fin d'intervention. Sur ce dernier point, les métriques d'évaluation de la collaboration restent encore très limitées. Enfin, bien qu'assez souvent implémente, l'action de déplacer à deux un objet virtuel n'a pas été étudiée en détails : les recherches quantifient le nombre de fois où l'action conjointe est menée sans regarder comment celle-ci est réalisée.

2. Les agents anthropomorphes pour l'interaction non verbale

Un agent virtuel est un personnage animé (2D ou 3D) dont les comportements (expressions faciales, mouvement du corps, regard, ...) sont contrôlables. Ils peuvent donc servir à concevoir des vidéos d'animation qui seront ensuite sélectionnées et affichées durant l'interaction, ou même réagir en temps réel aux comportements de l'utilisateur durant l'interaction (ce qui soulève des défis complexes en termes de génération dynamique de comportements multimodaux). Selon les plateformes informatiques et prototypes de recherche utilisés, ces agents virtuels peuvent être plus ou moins expressifs, et plus ou moins interactifs en temps réel. Ils sont particulièrement pertinents pour la simulation et l'entraînement de compétences sociales. Les agents virtuels animés ont en effet de multiples avantages par rapport à des vidéos préenregistrées de personnes. Leurs expressions non-verbales (par exemple expressions faciales, regards, postures) peuvent être contrôlées plus finement. Quand ils sont réellement interactifs (et donc pas seulement des vidéos préenregistrées), ils peuvent servir à entraîner des comportements continus et fins (par exemple suivi du regard comme nous le verrons plus loin). Ils sont ainsi vus comme un bon compromis entre contrôle expérimental et validité écologique pour étudier et simuler des interactions sociales à l'aide de comportements verbaux et non-verbaux. Certains de ces prototypes ont été conçus pour et évalués par des personnes avec TSA.

L'utilisation d'agents virtuels dans la littérature peut être vue sous deux angles : 1) permettre des études expérimentales pointues visant à mieux comprendre certains déficits spécifiques des personnes avec TSA (souvent sans contexte situationnel très riche), et 2) à un niveau plus macroscopique, concevoir et évaluer des systèmes d'entraînement virtuel à des compétences sociales (souvent dans une ou plusieurs situations d'interaction spécifiques). De nombreuses études ne permettent pas un apprentissage réel de compétences en interaction sociale dyadique car les comportements de l'utilisateur n'impactent pas les comportements de l'agent virtuel : il s'agit juste de présentation non interactive avec un agent virtuel et un utilisateur (Grynszpan, Martin & Nadel, 2008 ; Martin, 2018). Pourtant les compétences en ajustement dynamique en temps réel durant les interactions sociales doivent justement être entraînées chez les personnes avec TSA. Dans des situations d'apprentissage, l'interaction avec des pairs a montré des résultats positifs (Bowman-Perrott et al., 2013). Un système exploitant cette piste permet à un enfant autiste de jouer avec des objets physiques comme les éléments constitutifs d'une maison pour enfant, tout en interagissant avec un enfant virtuel à propos de ce jouet (Tartaro, Cassell, Ratz, Lira, & Nanclares-Nogués, 2014). Même si les objets

physiques ne sont pas interactifs, ils permettent d'ancrer les interactions sociales dans le monde physique et réel.

4.2.2 - Autisme et entraînement de l'action motrice individuelle et à deux par des technologies interactives

Dans l'objectif de concevoir des logiciels dédiés à l'autisme, l'impact de quatre jeux Kinect Sports sur les compétences attentionnelles a été étudié (Bartoli, Corradi, Garzotto, & Valoriani, 2013). Les auteurs soulignent les questionnements que l'utilisation de ce type de dispositif avec des enfants avec TSA engendre : l'enfant va-t-il comprendre une interaction « intangible » (i.e., un mouvement sans contact ayant un effet) ? En effet, les exergames commerciaux restent encore largement inadaptés pour l'entraînement d'enfants avec TSA. Sur le plan moteur les gestes demandés par le jeu ne sont pas nécessairement pertinents, sur le plan sensoriel ces jeux offrent un nombre important de sources potentielles de distraction, et enfin sur le plan social ces jeux s'appuient sur des codes sociaux n'étant pas acquis par des enfants avec TSA (Edwards, Jeffrey, May, Rinehart, & Barnett, 2017). Des dispositifs mieux adaptés à cette population ont ensuite vu le jour.

La possibilité de capter les mouvements du corps d'une personne via divers capteurs a très tôt été explorée dans l'idée de fournir une aide à l'entraînement moteur. Virtual PAT a été l'un des premiers systèmes qui utilise la captation de mouvement basée sur la vidéo permettant des retours personnalisés sur la performance (Davis & Bobick, 1998). Mais c'est depuis le développement des capteurs de mouvements à moindre coût que des projets de conception de systèmes capables de s'adapter en temps réel ont été mis au point pour le grand public. La majorité de ces projets se base sur des caméras de profondeur de type Kinect.

Pour les enfants, l'apprentissage de compétences motrices via l'utilisation de ces technologies se fait souvent par le développement d'un jeu. Ainsi un jeu est proposé où l'enfant prend le rôle d'un gardien de foot : grâce à la capture de ses mouvements, le système affiche ses mains dans une cage de football avec comme tâche d'attraper les ballons tirés par un personnage virtuel (Hsiao & Chen, 2016). Un des intérêts de ces approches est de combiner l'apprentissage moteur avec d'autres types d'apprentissages, comme avec la Kinems Suite qui y associe un entraînement cognitif et académique (Kourakli et al., 2017). Dans ce type de contexte d'apprentissage, la précision limitée du capteur est moins impactante. C'est au niveau de la sélection des tâches et des mouvements ainsi que de la conception du mode de jeu et du processus d'apprentissage que se situent les enjeux. Une des conséquences est que très peu de ces jeux utilisent les informations de mouvements quantifiées pour l'analyse des performances de l'enfant,

se limitant à un décompte du nombre de gestes par exemple. Dans le cas d'enfants présentant des problèmes de coordinations motrices, on étudie la stabilité de la main lors de tâches pour évaluer le progrès des enfants (Kourakli et al., 2017). Forts de leur expérience de déploiement de jeux commerciaux Kinect dans des lieux pour enfants avec TSA, Bartoli, Garzotto, Gelsomini, Oliveto, & Valoriani (2014) proposent une série de principes de conception qui informent le développement de trois mini-jeux basés sur la Kinect. Parmi les 23 principes énoncés, une partie est spécifique à un type de compétence (motrice, cognitive ou sociale). Douze principes généraux sont communs à tout type d'application et renseignent le processus de conception : un jeu par enfant (personnalisation) ; des tâches évolutives ; un but unique ; des instructions visuelles ; un graphisme minimaliste ; une audio claire ; des stimuli dynamiques ; une utilisation des avatars. Le premier jeu, « Jeu de Bulles », a pour but d'améliorer la précision des mouvements de l'enfant ainsi que la coordination visuomotrice en proposant à l'enfant d'attraper des bulles via son avatar articulé. Le deuxième jeu, « Jeu d'Espace », travaille l'attention sélective et soutenue : l'enfant doit déplacer un « avatar pointeur » (avec sa main, ce n'est pas un avatar articulé) pour éviter des objets qui tombent. Enfin, le troisième jeu, « Jeu de Forme », se concentre sur la conscience que l'enfant a de son corps via un jeu de silhouette : l'enfant doit imiter une silhouette avec son propre corps. Le point fort de ce projet est la possibilité pour le clinicien de personnaliser chaque jeu pour chaque enfant, par exemple en variant le nombre d'objets, les parties du corps actives ou le fond d'écran du jeu.

Dans le même esprit mais avec un développement plus complet, Pictogram Room a été conçu comme un jeu vidéo éducatif où l'enfant avec TSA interagit dans le jeu via son avatar directement relié à ses propres mouvements (Herrera et al., 2012). Pour faciliter la reconnaissance de son avatar par l'enfant, une représentation minimaliste a été choisie, en « fil de fer » et mono-couleur. Ce logiciel propose comme objectif pédagogique d'entraîner le langage corporel, l'attention et l'imitation. Les 80 jeux sont organisés en 4 catégories : « le corps », « les postures », « signaler » et « imiter ». Cette grande variété de tâches a pour but de cibler des compétences précises à développer chez l'enfant (par exemple l'activité « Montrer par le regard » permet de travailler l'attention conjointe dans la rubrique « signaler »), ainsi que de mettre en place des programmes personnalisés (Herrera & Perez-Fuster, 2018). Plusieurs thérapies exploitent cette application ou une partie de cette application : ainsi Nadel et Poli ont mis au point une évaluation et un entraînement de la connaissance de soi en exploitant plusieurs ressources de Kinect (corps apparaissant en reflet, en contour ou en avatar). Ils utilisent en outre les objets virtuels de l'application Pictogram Room pour entraîner le calibrage intentionnel du mouvement (Nadel et Poli, 2018).

4.3 - CONCLUSION

Cette revue de la littérature a listé les principaux travaux portant sur la coordination motrice, incluant la collaboration motrice, la coopération motrice et l'action conjointe. Elle a sélectionné les dispositifs issus des nouvelles technologies qui permettent d'entraîner des enfants avec TSA en créant notamment des avatars partenaires.

La littérature nous apprend que la coordination motrice interindividuelle suppose, pour se réaliser, de bonnes capacités individuelles d'équilibre postural, en ce que cet équilibre de chacun assure la stabilisation des articulations, le calibrage du mouvement et la planification de la posture initiale aboutissant à une posture confortable du partenaire pour réaliser son objectif dans l'action commune. Outre ces capacités motrices individuelles, des capacités sociales et cognitives sont nécessaires : être capable de suivre le regard de l'autre pour anticiper son mouvement vers la cible, être capable de planifier son action en référence au mouvement de l'autre, être capable de prendre la perspective de l'autre, être capable d'assurer un rôle différent de son partenaire, être capable d'imiter de façon synchrone.

En repérant les différents types de procédure utilisés pour les actions motrices à deux, nous avons pu distinguer quatre types de mouvements à deux : des mouvements simultanés mais libres menant vers un but commun, des mouvements simultanés mais complémentaires assurant des rôles moteurs différents pour le même but, des mouvements successifs complémentaires où le sous-but est différent pour chaque partenaire, et des mouvements simultanés et similaires où le but est le même pour chacun (l'imitation est ici facilitante).

Les nouvelles technologies contribuent à une analyse des compétences requises dans la collaboration motrice et à leur entraînement. Les principales technologies utilisées dans le but d'améliorer les compétences motrices se basent sur des caméras de profondeur avec capteurs de mouvement de type Kinect car elles permettent de discriminer les parties du corps. On peut ainsi comparer par exemple les mouvements du professeur de danse et ceux de l'élève, avec retour en temps réel sur le mouvement à réaliser. Les applications sportives interactives (et les capteurs associés) à bas coût sont une opportunité pour travailler la collaboration motrice en développant la connaissance du corps via des informations sensorielles multimodales. Les agents virtuels ajoutent l'élément interactif contrôlable qui est nécessaire pour entraîner la collaboration motrice de façon contrôlée avant de la réaliser entre deux humains. Les dispositifs de tables interactives permettent d'étudier les mécanismes de la collaboration entre deux personnes. Toutefois, bien qu'assez souvent implémentée, l'action de

déplacer à deux un objet virtuel sur une table n'a pas été étudiée en détail : les recherches quantifient la fréquence de réussite de la tâche sans en analyser les processus. Notre contribution est de ce fait originale et devrait permettre une avancée dans l'analyse des prérequis d'une collaboration motrice et dans leur prise en compte au cours d'un entraînement.

4.4 - RÉFÉRENCES

American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders* (5th ed.). Washington, DC: Author.

Baird, G., Charman, T., Baron-Cohen, S., Cox, A., Swettenham, J., Wheelwright, S., & Drew, A. (2000). A screening instrument for autism at 18 month of age. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 39, 694-702.

Baron-Cohen, S., Allen, J., & Gillberg, C. (1992). Can Autism be Detected at 18 Months? The Needle, the Haystack, and the CHAT. *British Journal of Psychiatry*, 161, 6, 839-843.

Chartrand, T. L., & Bargh, J. A. (1999). The chameleon effect: The perception-behavior link and social interaction. *Journal of Personality and Social Psychology*, 76, 893-910.

Colombi, C., Liebal, K., Tomasello, m., Young, G., Warneken, F., & Rogers, S. (2009). Examining correlates of cooperation in autism. *Autism*, 13, 2, 143-163.

Decety, J. & Grèzes, J. (1999). Neural mechanisms subserving the perception of human actions. *Trends In Cognitive Sciences*, 3, 5, 172-178.

Delaveau, P., Arzounian, D., Rotgé, J.-Y., Nadel, J., & Fossati, P. (2015). Does imitation act as an oxytocin nebulizer in autism spectrum disorder? *Brain*, 138, 7, 1-4.

Dumas, G., Nadel, J., Soussignan, R., Martinerie, J., & Garnero, L. (2010). Interbrain synchronization during social interaction. *PlosOne*, 5, 8.

Fournier, K. A., Hass, C. J., Naik, S. K., Lodha, N., & Cauraugh, J. H. (2010). Motor coordination in autism spectrum disorders: A synthesis and meta-analysis. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 40, 10, 1227-1240.

- Gonzalez, D. A., Glazebrook, C. M., Studenka, B. E., & Lyons, J. (2013). Motor interactions with another person: do individuals with Autism Spectrum Disorder plan ahead? *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 7, 1–9.
- Herrera, G., Casas, X., Sevilla, J., Rosa, L., Pardo, C., Plaza, J., Le Groux, S. (2012). Pictogram room: Natural interaction technologies to aid in the development of children with autism. *Annuary of Clinical and Health Psychology*, 8, 39-44.
- Hove, M., & Risert, J. (2009). It's all in the timing : interpersonal synchrony increases affiliation. *Social cognition*, 27, 6, 949-960.
- Jeannerod, M. (2001). Neural simulation of action : A unifying mechanism for motor cognition, *Neuroimage*, 14, 1-2, 103-109. <https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0832>
- Kelso, J. (1995). *Dynamic patterns*. Cambridge, MA: MIT Press.
- McDonald, M.M., Lord, C., & Ulrich, D. (2013). The relationships of motor skills and social communicative skills in school-aged children with autism spectrum disorder. *Adapted Physical Activity Quarterly*, 30, 3, 271-282.
- Mundy, P., Sigman, M., & Kasari, C. (1990). A longitudinal study of joint attention and language development in autistic children. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 20, 1, 115-128.
- Nadel, J. (2016). *Imiter pour grandir : Développement du bébé et de l'enfant avec autisme* (2nd ed.). Paris : Dunod.
- Nadel, J., & Baudonnière, P-M. (1982). The social function of reciprocal imitation in 2-year-old peers. *International Journal of Behavioral Development*, 5, 95-109.
- Nadel, J., & Poli, G. (2018). Evaluer et entraîner la connaissance du corps dans l'autisme via kinect et pictogram room. *Enfance*, 1, 51-64.
- Richardson, M. J., Marsh, K. L., & Baron, R. M. (2007). Judging and Actualizing Intrapersonal and Interpersonal Affordances. *Journal of Experimental Psychology*, 33, 4, 845-859.

- Richardson, M. J., Harrison, S. J., Kallen, R. W., Walton, A., Eiler, B. A., Saltzman, E. & Schmidt, R. C. (2015). Self-Organized Complementary Joint Action: Behavioral Dynamics of an Interpersonal Collision-Avoidance Task. *Journal of Experimental Psychology*, 41, 3, 665-679.
- Rizzolatti, G., & Craighero, L. (2004). The mirror neuron system. *Annual Review of Neuroscience*, 27, 169-192.
- Rosenbaum, D. A., & Jorgensen M. J. (1992). Planning macroscopic aspects of manual control. *Human Movement Science*, 11, 1-2, 61-69.
- Schmidt, R.C., & Richardson, M.J. (2008). Dynamics of Interpersonal Coordination. In A. Fuchs & V.K. Jirsa (eds), *Coordination: Neural, Behavioral and Social Dynamics* (pp 281-308). Berlin: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74479-5_14
- Sebanz, N., Bekkering, H., & Knoblich, G. (2006). Joint action : bodies and minds moving together. *Trends in Cognitive Science*, 10, 2, 70-76.
- Zwaigenbaum, L., Bryson, S., Rogers, T., Roberts, W., Brian, J., Szatmari, P. (2005). Behavioral manifestations of autism in the first year of life. *International Journal of Developmental Neuroscience*, 23, 2-3, 143-152.

REFERENCES INFORMATIQUES

- Bartoli, L., Corradi, C., Garzotto, F., & Valoriani, M. (2013). Exploring Motion-based Touchless Games for Autistic Children's Learning. In *Proceedings of the 12th International Conference on Interaction Design and Children* (p. 102–111). New York, NY, USA: ACM.
- Bartoli, L., Garzotto, F., Gelsomini, M., Oliveto, L., & Valoriani, M. (2014). Designing and Evaluating Touchless Playful Interaction for ASD Children. In *Proceedings of the 2014 Conference on Interaction Design and Children* (p. 17–26). New York, NY, USA: ACM.
- Battocchi, A., Ben-Sasson, A., Esposito, G., Gal, E., Pianesi, F., Tomasini, D., ... Zancanaro, M. (2010). Collaborative puzzle game: a tabletop interface for fostering collaborative skills in children with autism spectrum disorders. *Journal of Assistive Technologies*, 4(1), 4-13.

- Bowman-Perrott, L., Davis, H., Vannest, K., Williams, L., Greenwood, C., & Parker, R. (2013). Academic Benefits of Peer Tutoring: A Meta-Analytic Review of Single-Case Research. *School Psychology Review*, 42(1), 39-55.
- Davis, J. W., & Bobick, A. F. (1998). Virtual PAT: A Virtual Personal Aerobics Trainer. In *Workshop on Perceptual User Interfaces* (p. 13–18).
- Dietz, P., & Leigh, D. (2001). DiamondTouch: A Multi-user Touch Technology. In *Proceedings of the 14th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (p. 219–226). New York, NY, USA: ACM.
- Edwards, J., Jeffrey, S., May, T., Rinehart, N. J., & Barnett, L. M. (2017). Does playing a sports active video game improve object control skills of children with autism spectrum disorder? *Journal of Sport and Health Science*, 6(1), 17-24.
- Fernaesus, Y., Tholander, J., & Jonsson, M. (2008). Towards a New Set of Ideals: Consequences of the Practice Turn in Tangible Interaction. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Tangible and Embedded Interaction* (p. 223–230). New York, NY, USA: ACM.
- Fitzmaurice, G. W., Ishii, H., & Buxton, W. A. S. (1995). Bricks: Laying the Foundations for Graspable User Interfaces. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (p. 442–449). New York, NY, USA: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- Gal, E., Bauminger, N., Goren-Bar, D., Pianesi, F., Stock, O., Zancanaro, M., & (Tamar) Weiss, P. L. (2009). Enhancing social communication of children with high-functioning autism through a co-located interface. *AI & SOCIETY*, 24(1), 75.
- Giusti, L., Zancanaro, M., Gal, E., & Weiss, P. L. (Tamar). (2011). Dimensions of Collaboration on a Tabletop Interface for Children with Autism Spectrum Disorder. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (p. 3295–3304). New York, NY, USA: ACM.
- Grynszpan, O., Martin, J.-C., & Nadel, J. (2008). Multimedia interfaces for users with high functioning autism: An empirical investigation.

International Journal of Human-Computer Studies, 66(8), 628-639.

Hornecker, E., & Buur, J. (2006). Getting a Grip on Tangible Interaction: A Framework on Physical Space and Social Interaction. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (p. 437–446). New York, NY, USA: ACM.

Kourakli, M., Altanis, I., Retalis, S., Boloudakis, M., Zbainos, D., & Antonopoulou, K. (2017). Towards the improvement of the cognitive, motoric and academic skills of students with special educational needs using Kinect learning games. *International Journal of Child-Computer Interaction*, 11, 28-39.

Legoff, D. B., & Sherman, M. (2006). Long-term outcome of social skills intervention based on interactive LEGO© play. *Autism*, 10(4), 317-329.

Martin, J.-C. (2018). Agents virtuels pour l'apprentissage de compétences sociales dans l'autisme : une revue. *Enfance*, (1), 13-30.

Tartaro, A., Cassell, J., Ratz, C., Lira, J., & Nanclares-Nogués, V. (2014). Accessing Peer Social Interaction: Using Authorable Virtual Peer Technology as a Component of a Group Social Skills Intervention Program. *ACM Transactions on Accessible Computing*, 6(1), 2:1–2:29.

Wade, J., Sarkar, A., Swanson, A., Weitlauf, A., Warren, Z., & Sarkar, N. (2017). Process Measures of Dyadic Collaborative Interaction for Social Skills Intervention in Individuals with Autism Spectrum Disorders. *ACM Transactions on Accessible Computing*, 10(4), 13:1–13:19.

Zhang, L., Fu, Q., Swanson, A., Weitlauf, A., Warren, Z., & Sarkar, N. (2018). Design and Evaluation of a Collaborative Virtual Environment (CoMove) for Autism Spectrum Disorder Intervention. *ACM Transactions on Accessible Computing*, 11(2), 11:1–11:22.

V - LA MÉTHODOLOGIE DU PROJET

5.1 - EXPOSÉ DE LA MÉTHODE

La méthode est ascendante: elle part d'une construction basique inspirée par l'existant en interaction humain/machine, pour s'adapter progressivement, grâce à une approche interdisciplinaire, aux besoins des utilisateurs et des professionnels pilotant le dispositif, et finalement pour aboutir à réaliser un dispositif d'entraînement à la collaboration motrice d'enfants avec TSA de tout niveau, y compris non verbal, testé dans un cadre clinique en une étude expérimentale de type evidence-based.

Dans le but de créer un logiciel d'entraînement à la collaboration motrice pour des enfants ayant reçu un diagnostic de trouble du spectre autistique (TSA), la méthode doit répondre à plusieurs objectifs, les uns techniques d'interactivité humain-machine, les autres référés aux spécificités des populations autistes concernées. Il faut donc construire en s'assurant de la reproductibilité du design (méthode 1), vérifier l'éligibilité de ce qui a été construit auprès d'une population normative d'enfants (méthode 2), puis tester auprès d'enfants avec TSA l'efficacité du dispositif révisé en fonction des résultats des enfants contrôle, dans une procédure expérimentale à plusieurs pas répondant à des niveaux différents d'apprentissage (méthode 3).

Ces différents objectifs se démultiplient en sous-buts pour chaque phase méthodologique.

5.1.1 - Méthode 1 : Construire un dispositif interactif humain/machine adapté à l'autisme et reproductible

Premier sous-but : construire un dispositif interactif reproductible

La méthode a consisté à partir des existants susceptibles de répondre aux objectifs d'interactivité humain-machine et de reproductibilité du dispositif. De ce fait, les existants retenus doivent être gratuits ou d'utilisation libre, de façon à être aisément reproductibles. La phase technique a pris en compte les réalisations existantes en intégrant des logiciels déjà disponibles, libres et/ou gratuits (Unity, Blender, Pictogram Room) donc facilement réutilisables, et les a adaptés à l'objectif. Le dispositif se compose d'une structure en aluminium supportant la fenêtre interactive (1,5m* 1m), d'une structure en bois conçue comme une façade de mobilier et un cadre pour la fenêtre, d'un vidéoprojecteur, et d'une face arrière (0,6m de profondeur) fermée par

une porte avec tout le matériel nécessaire à l'intérieur. L'appareil est stable et résiste aux coups sans aucun risque. Comme l'appareil est imposant, la façade en bois apporte une certaine familiarité et la couleur blanche de la partie supérieure de l'appareil limite sa saillance dans le champ perceptif. Une vidéo-projection à très courte portée a été choisie pour limiter les ombres pendant l'interaction. Cette phase a demandé de réaliser de la menuiserie autour de la conception informatique. Les spécifications des différents composants sont disponibles sur demande à jean-claude.martin@u-psud.fr.

Deuxième sous-but : adapter le système interactif aux spécificités de l'autisme

Une fois cette phase achevée, une sélection guidée par l'équipe spécialisée dans l'autisme a été réalisée pour prendre en compte les spécificités autistiques. Satisfaire aux besoins de réalisme des enfants avec TSA a impliqué d'opter pour une mixité des objets qui devaient être mi-tangibles (attrapables) et mi-virtuels.

Les objets tangibles ont été fabriqués sur mesure en EVA, une mousse de haute densité utilisée pour les jeux d'enfants et les tapis. Dans ce projet, le choix a été fait de concevoir trois objets représentant une table (en violet), un tabouret (en rouge) et une boîte (en bleu). Chaque objet tangible tient sur la cloison car il est magnétisé à un objet jumeau situé derrière. Pour permettre aux parties avant et arrière des objets de glisser facilement tout en étant fermement attirées l'une vers l'autre, la cloison est constituée d'un matériau composite mince (4 mm d'Alu Dibond®) recouvert d'un revêtement glissant sur les deux faces (Velleda®). Des aimants de différentes puissances ont été testés pour trouver le meilleur compromis entre une forte attraction et un bon glissement.

Le choix des matériaux a été soigneux pour éviter de rencontrer des hypersensibilités perceptives ou encourager des stéréotypies, et pour assurer la sécurité des jeunes utilisateurs.

Un autre impératif de l'équipe clinique était que le système interactif soit d'utilisation intuitive pour les enfants avec TSA même non verbaux. En outre, le dispositif devait être dépouillé d'enrichissement susceptible de représenter des distracteurs d'attention. Ainsi, les personnages virtuels anthropomorphes ont été conçus sans caractéristiques et expressions faciales pour limiter la complexité sociale de la scène virtuelle. Comme l'entraînement implique d'interagir dans deux modes (un mode suiveur et un mode leader), deux personnages virtuels différents ont été conçus, différenciés l'un de l'autre par une couleur et un chapeau différent (cf. figure1). Ces différences permettent d'attribuer un rôle spécifique à un

personnage identifiable. Des noms ont été donnés à chaque personnage pour les personifier et faciliter les instructions orales pour les praticiens («Michou» pour le personnage suiveur, «Lola» pour le personnage meneur).



Figure 1 : a. Les deux agents virtuels. b. Séquence de mouvements en mode suiveur. c. Séquence de mouvements en mode meneur.

Les comportements non-verbaux de l'agent ont été conçus de manière à être aussi simples que possible. Lors des phases inactives, le personnage est animé par une animation d'attente de type oscillation droite-gauche sur place. À la demande du praticien, le personnage virtuel peut saisir un objet virtuel. Cette animation de saisie a été réalisée à l'aide d'un algorithme de cinématique inverse humanoïde. Deux modes d'interaction ont été conçus :

- > Mode suiveur : le personnage tient l'objet virtuel qui reste aligné sur la partie tangible. L'enfant doit effectuer un mouvement vers une cible spécifique indiquée par le praticien. Dans la figure 1.b, il faut déplacer avec Michou la boîte bleue de la table violette vers le tabouret rouge.
- > Mode meneur : le personnage initie un mouvement avec la partie virtuelle de l'objet qui se détache visuellement de la partie tangible de l'objet. L'enfant doit suivre le mouvement du personnage vers une cible spécifique qui lui est inconnue. Si l'enfant ne suit pas l'objet virtuel d'assez près, le personnage principal libère l'objet et une animation de fumée s'affiche autour de la partie virtuelle de l'objet. Dans la figure 1.c, il faut déplacer avec Lola la boîte bleue en suivant Lola qui décide de la vitesse et du parcours.

La méthode 1 a fait l'objet d'un article accepté à la conférence internationale 15th ACM International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction (TEI 2021) (Giraud et al. 2021a).

5.1.2 - Méthode 2 : réaliser une étude d'usage auprès d'enfants témoins

Une fois le dispositif construit, il restait à en tester l'usage non plus entre nous, adultes, mais auprès d'une population de même âge chronologique que celle de la future population avec TSA du Centre TEDyBEAR.

Participants

Dix enfants- contrôle (6 garçons et 4 filles), âgés entre 4 et 10 ans ont été recrutés sur la base de leurs âges chronologiques pour réaliser des tâches de collaboration motrice avec un agent virtuel. Les âges chronologiques devaient correspondre à ceux de la population -cible avec TSA (utilisateurs finaux) car l'objectif de l'étude était d'ajuster la plate-forme à la taille et à la stature de jeunes participants. Ayant des tailles et des poids similaires à ceux des enfants avec TSA sélectionnés, et capable d'exprimer verbalement leurs impressions, cette population-contrôle devait nous permettre de recueillir des informations essentielles à la configuration finale du dispositif, d'un point de vue physique et sensoriel. Leurs consentements ainsi que celui de leurs parents ont été recueillis comme requis par la déclaration d'Helsinki et le Comité d'Ethique de la Recherche de l'Université Paris Saclay¹.

Procédure

Dès leur arrivée, les parents prenaient connaissances et signaient (s'ils le souhaitaient) un formulaire de consentement. Le formulaire, validé par le Comité d'Ethique de la Recherche de l'Université Paris Saclay, comportait une description de nos objectifs de recherche ainsi que des tâches demandées à leur enfant. Une attention particulière a été portée à la compréhension par les parents et les enfants que ce n'était pas l'enfant qui était testé mais le dispositif. Les enfants étaient encouragés à exprimer leurs impressions, bonnes et/ou mauvaises, à tout moment. L'enfant réalisait les tâches, guidé par un expérimentateur, pendant que deux autres expérimentateurs restaient en tant qu'observateurs, les parents restant présent dans la pièce. La tâche durait environ 15 minutes. L'enfant devait réaliser une série de déplacements d'objets mixtes dans 3 conditions différentes : sans agent, avec l'agent suiveur et avec l'agent meneur. Ces mouvements étaient :

- > Déplacer la boîte bleue depuis le sol vers le dessus du tabouret rouge
- > Déplacer la boîte bleue depuis le dessus du tabouret rouge vers le dessus de la table violette

¹ - <https://www.universite-paris-saclay.fr/recherche/polethis-ethique-et-integrite/comite-dethique-de-la-recherche> (avis no 71, 22 Janvier 2019)

- > Déplacer la boîte bleue depuis le dessus de la table violette vers le dessus du tabouret rouge
- > Déplacer la boîte bleue depuis le dessus du tabouret rouge vers le sol

La réalisation de la tâche était suivie d'une interview semi-structurée d'une durée de 20 minutes. L'interview portait sur l'appréciation du dispositif, la compréhension de la fenêtre réelle-virtuelle, l'interaction avec les objets et la cloison et enfin sur la collaboration motrice avec les agents virtuels. Les parents pouvaient intervenir pour reformuler et clarifier les questions, si besoin.

Nos propres observations durant cette étude ont conduit à plusieurs adaptations du système. Tout d'abord il fallait concevoir 3 tailles différentes d'agents, de façon à les rendre adaptables à la taille de chaque participant/e (dorénavant, avant le début de la tâche, on indique la taille de l'enfant, ce qui se traduit par le choix automatique d'une taille d'agent). Ensuite, il fallait adapter la hauteur minimale de l'étagère du bas : les enfants les plus grands ont eu des difficultés à déplacer l'objet lorsqu'il était bas. Nous avons donc conçu une étagère ajustable permettant de régler la hauteur minimale de la zone d'interaction.

Autre observation qui nous a conduit à révision, tous les enfants ont spontanément détaché l'objet de la paroi la première fois. Il est apparu que faire glisser l'objet le long de la paroi au lieu de le prendre, n'est pas intuitif. Les enfants ont ainsi dû s'adapter et cette adaptation a pris plus ou moins de temps (certains l'ont assimilé immédiatement lors du 2^{ème} essai, d'autres ont eu besoin de 5 minutes). Toutefois, lorsque les enfants détachaient de façon accidentelle l'objet du mur, ils comprenaient comment remettre la partie réelle de l'objet en place par rapport à la partie virtuelle.

Nous avons également pu noter que déplacer l'objet lorsqu'il est situé plus bas que les genoux était plus difficile. Bien que tous les enfants aient pu surmonter leur difficulté et terminer l'expérience, certains ont dû parfois changer de posture, voire se mettre à genoux pour faire glisser l'objet, la résistance semblant un peu forte, surtout pour les plus jeunes. Néanmoins, cette difficulté leur est apparue naturelle au vu du scénario qui consiste à déplacer à deux un objet lourd. Nous avons revu en conséquence la force des aimants de façon à rendre le glissement plus facile, mais pas trop afin de conserver l'impression d'objet lourd liée à la résistance. Nous avons aussi compris qu'une phase d'exercice préalable était nécessaire pour éviter de détacher l'objet de la paroi et au contraire de le faire glisser.

Les autres ajustements sont venus des interviews. L'ensemble des enfants

ont perçu que l'espace virtuel se trouvait "en face d'eux". Aucune remarque négative n'est apparue sur la qualité de l'affichage ou sur d'éventuelles difficultés à percevoir le monde virtuel.

Au regard des réponses, il est apparu clairement que déplacer un objet selon un plan en deux dimensions n'est pas naturel pour un enfant et qu'il est plus pertinent de faire référence au mouvement comme à un glissement plutôt que comme à un déplacement ou un mouvement. Un autre élément à corriger était d'éviter les distractions dues aux repaires affichés en direction des praticiens : nous les avons rendus moins visibles en retirant la couleur, en ajoutant de la transparence et en diminuant leur taille.

Enfin, la perception de la collaboration motrice n'a pas toujours été claire. Lorsque nous leur avons demandé de décrire l'interaction, les enfants ont répondu qu'ils avaient déplacé l'objet avec Lola ou Michou, leur donnant ainsi vie. Le mouvement de saisie de l'objet virtuel par l'agent a déclenché à plusieurs reprises un mouvement de saisie de l'objet réel chez certains enfants. Cependant deux enfants ont décrit la tâche à réaliser avec Lola (l'agent meneur) comme un déplacement 'en même temps', c'est-à-dire plutôt comme une action en parallèle que comme une collaboration motrice. Nous retiendrons de ces cas que la tâche peut être comprise comme une tâche motrice et non comme une tâche de collaboration motrice. La méthode 2 est décrite dans un article qui a été accepté à la 32^e Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine (IHM'2021) (Giraud et al. 2021b)².

5.1.3 - Méthode 3 : réaliser une étude normative et une étude de type evidence-based testant l'efficacité du dispositif pour exercer la collaboration motrice d'enfants avec TSA

La troisième méthode comporte deux axes. Le premier axe est normatif et fournit des résultats globaux dont on verra les limites. Le deuxième axe correspond à une étude de type evidence-based où chaque sujet est son propre contrôle et les différents scénarios qu'il a réalisés sont la population d'étude. Ce cadre méthodologique de suivi individuel nous permet de ne pas rechercher l'homogénéité de la population étudiée sur une ou plusieurs variables comme l'âge développemental ou l'accès au langage. Tout au contraire, nous avons visé l'inclusion d'une diversité d'enfants avec TSA modéré à sévère dont certains ont un petit langage conversationnel tandis que d'autres sont totalement non verbaux. La raison en est que notre objectif est d'ouvrir l'accès aux nouvelles technologies à des enfants qui en sont jusque-là exclus en raison de leur faible efficacité dans la compréhension des symboles, que ceux-ci soient langagiers ou de type pictogrammes. Il

2 - <https://ihm2020.afihm.org/fr/?accueil>

aurait été simple et sans doute plus satisfaisant au niveau des résultats quantitatifs, de sélectionner la population d'étude. ***Mais pour nous, dans notre démarche citoyenne, tester le dispositif, c'est aussi et surtout tester s'il est ouvert à des enfants sévèrement handicapés, et notamment à des enfants non verbaux.***

Population d'étude

Douze enfants de 4a11m à 9a4m (My d'âge chronologique : 7a0m ; médiane 6a6m) ont été inclus sur la base de l'accord parental et de leur propre disponibilité pour nous suivre dans la salle expérimentale. Parmi ces 12 enfants, 7 ont un petit langage conversationnel mais ne peuvent pas être considérés comme verbaux, et trois sont de bon niveau cognitif. Tous sauf le plus jeune sont capables de reconnaître être imité, ce qui correspond à une reconnaissance de soi utile pour discriminer le mode suiveur par Michou du mode meneur par Lola. Les caractéristiques des participants sont présentées ci-dessous dans le tableau 1.

Enfants	AC	AD	L	REI
204	96	83	V	3
111	83	84	V	3
105	83	73	V	3
106	77	64	V	2
108	89	80	V	2
112	76	70	V	2
201	78	56	V	3
109	78	58	NV	3
103	112	60	NV	2
102	90	48	NV	1
110	77	58	NV	1
113	59	36	NV	0

Tableau 1 - Caractéristiques des participants

Age Chronologique (AC), Age Développemental (AD), Langage (LégerVerbal/Non Verbal), Reconnaissance d'être imité (REI)

Procédure

L'enfant est conduit dans la salle Kinect où a été implantée la plate-forme. On lui indique de se placer devant la plate-forme, debout face à l'écran. Il est invité à déplacer la boîte sur la base d'une démonstration ou d'une proposition verbalisée.

L'entraînement comprend 3 étapes : une étape de familiarisation avec le dispositif, une étape d'entraînement à faire en sorte que Michou suive le trajet initié par l'enfant, c'est-à-dire à respecter l'adhérence entre l'objet tangible et l'objet réel, et une étape d'entraînement à se synchroniser avec l'avatar autonome Lola. Lola utilise 3 vitesses et varie l'orientation de ses déplacements en fonction de 4 scénarios.

Un scénario est défini comme la tâche consistant à déplacer un objet spécifique vers une cible spécifique en même temps que le personnage virtuel. Les 4 scénarios sont : Hisser la boîte depuis le tabouret jusqu'à la table ; pousser le tabouret jusqu'à la table ; descendre la boîte posée sur la table jusqu'au tabouret ; descendre la boîte depuis le tabouret jusqu'au sol.

Recueil des données

La démarche normative dispose de deux types de recueil de données descriptives : les comportements filmés en continu et les données informatiques. Cependant l'étape préalable de familiarisation avec les lieux et le dispositif repose uniquement sur les observations comportementales filmées.

En ce qui concerne l'entraînement avec l'avatar suiveur et l'avatar initiateur, les données sont à la fois filmées et enregistrées automatiquement. Chaque séance se composant de plusieurs essais, le nombre de scénarios atteint le total de 573 pour 50 séances et devrait permettre de faire ressortir des généralités.

Les tableaux de données informatiques pour les 50 séances informent sur les éléments généraux suivants : la date de la séance, sa durée, la vitesse de déplacement, l'avatar impliqué, le nombre de scénarios réussis, échoués et avortés. On en voit un exemple dans le tableau 2 ci-dessous.

Séance	Agent	Vitesse	Scenario			
27/11/2019 15:29:19	1,3 Michou	0,1	0,15	0,44	1008	1
						SUCCESS
27/11/2019 15:32:26	1,3 Michou	0,1	0,15	0,44	1008	0
27/11/2019 15:33:14	1,3 Michou	0,1	0,15	0,44	1008	2
						SUCCESS
						SUCCESS
27/11/2019 15:36:05	0 Lola	0,1	0,15	0,44	1008	0
27/11/2019 15:36:57	1,3 Lola	0,1	0,15	0,44	1008	10
						FAILED
						FAILED

Tableau 2 - Extrait d'un relevé automatique de données globales

Une visualisation des scénarios est également disponible (cf. figure 3)

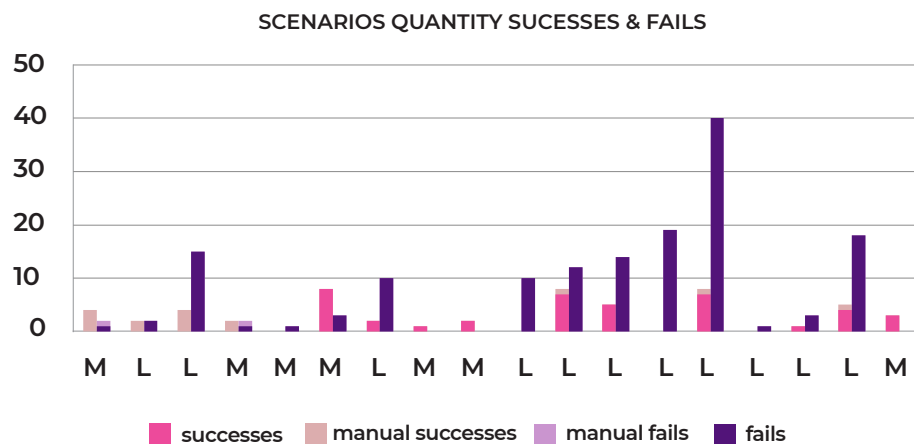


Figure 3- Exemple de visualisation des scénarios, par enfant

Dans un premier temps, les données automatiques ont été confrontées aux données filmées. Cela a permis de constater une petite imprécision du système qui a pour conséquence que certaines erreurs ne sont pas enregistrées alors qu'il y a un léger défaut d'adhérence entre l'objet réel et sa partie virtuelle. Inversement certaines réussites peuvent ne pas être comptabilisées à quelques millimètres d'adhérence près. L'observation des deux expérimentateurs présents a permis de constater la (rare) présence ou absence erronée d'étoiles de réussite ou de fumée d'échec. Il a de ce fait été ajouté un enregistrement manuel permettant de corriger ces erreurs d'affichage.

Les données automatiques recueillies sont aussi analytiques et ressortent de l'approche XXX. Elles concernent la vitesse du mouvement de l'enfant et sa précision par rapport au trajet de Lola. Pour cette analyse, seul l'entraînement avec Lola est pris en compte puisque dans l'entraînement avec Michou c'est l'enfant qui a l'initiative et l'agent le suit, par définition du protocole.

5.2 - PRÉSENTATION DE LA MOBILISATION DES CHERCHEURS ET DES ACTEURS DE TERRAIN POUR PARTICIPER À LA RECHERCHE

Les neuf premiers mois du projet ont été consacrés à l'exploration des solutions possibles pour réaliser un logiciel d'entraînement à la collaboration motrice. Au total, neuf séances de conception ont été réalisées. Toutes impliquaient l'ensemble de l'équipe des informaticiens et l'ensemble de l'équipe de psychopathologie de l'autisme. Elles ont permis de mettre au point la conceptualisation du design. Pour guider nos échanges durant cette phase, nous avons établi un document partagé résumant les besoins identifiés et une liste des spécificités associées aux solutions alternatives. Entre chaque réunion, le document était revu en fonction des retours de chaque équipe. Ces échanges nous ont permis d'identifier le prérequis de totale innocuité associé aux spécificités de l'autisme sévères comme l'automutilation, les stéréotypies et les intérêts restreints. Les psychologues ont expliqué comment ils ont installé Kinect dans une salle dédiée, rendant le vidéoprojecteur inaccessible, en insérant la caméra Kinect dans une console, et en cachant tous les câbles : cette explication nous a permis d'intégrer ces contraintes cliniques dans la construction de la plate-forme.

Par ailleurs, on construisait la procédure et discutait du moyen pour pouvoir comparer la performance de l'agent avec la performance de l'enfant. Les informaticiens ont proposé aux psychologues de recueillir automatiquement des paramètres du mouvement les psychologues ont proposé de se focaliser sur la vitesse du mouvement de l'enfant : comparée à la vitesse de l'agent autonome Lola, on peut en déduire la synchronie. De même en enregistrant le trajet moteur de l'enfant quand il déplace l'objet avec Lola, on peut mesurer la précision de ses ajustements à l'agent qui a l'initiative. A l'issue de ces 9 mois, le principe de construction du dispositif, la planification des études et le recueil des variables étaient précisés.

Les principales réunions sont listées dans le tableau ci-dessous.

Date	Partenaires	Objet
2017-06-22	LIMSI-ESTIA	Réflexions interaction tangible
2017-07-04	LIMSI-TEDyBEAR (JN JCM EP)	
2017-07-04	LIMSI ESTIA (DG JCM EP)	Possibilité haptiques et robotiques
2017-11-23	LIMSI TEDyBEAR	Analyse des besoins, littérature, embauche postdoc
2018-02-15	LIMSI TEDyBEAR	Planning observations à TEDyBEAR ; réflexions pré-tests et post-tests ; comité d'éthique
2018-03-22	LIMSI TEDyBEAR	Revue scientifique + questionnaires parents + liste des actions
2018-05-03	LIMSI TEDyBEAR	Revue état de l'art + discussion scénario + test 1er prototype
2018-06-07	LIMSI TEDyBEAR	Réflexions conception plateforme et scénarios
2018-08-30	LIMSI TEDyBEAR (TG JN JCM)	Liste des actions
2018-10-02	LIMSI TEDyBEAR	Avancement livrable état de la littérature et analyse des besoins ; Présentation avancement prototype : boîtier tracking + point sur mousse
2018-10-25	LIMSI TEDyBEAR	Finalisation livrable état de la littérature et analyse des besoins ; avancement logiciel et montage de la plateforme au LIMSI
2019-01-17	LIMSI TEDyBEAR (reunion au LIMSI)	Démonstration du dispositif monté au LIMSI ; discussion sur les détails des tests enfants neurotypiques ; planning de la suite : tests enfants avec TSA (description, demande CER) ; liste des suggestions de modification de la plateforme
2019-04-10	LIMSI TEDyBEAR	Avancement scénarios et futur transport vers TEDyBEAR
2019-04-15	LIMSI	Logiciel Unity ; façade en bois ; objets en mousse
2019-05-14	LIMSI	Assemblage au LIMSI ; amélioration tracking
2019-07-19	LIMSI TEDyBEAR (reunion au LIMSI)	Planning des test avec enfants neurotypiques ; planning transport à TEDyBEAR et entraînement enfants TSA ; etat actuel du prototype et améliorations prévues prochainement
2019-09-23	LIMSI TEDyBEAR	
2020-02-25	LIMSI TEDyBEAR	réunion exploitation fichiers de log
2020-06-12	LIMSI TEDyBEAR	Livrables, transport de la plateforme, film
2020-10-21	LIMSI TEDyBEAR	Livrables

Tableau 3 – Principales réunions entre partenaires chercheurs et acteurs de terrain

5.3 - EXPOSÉ DU TRAITEMENT DES RÉSULTATS

5.3.1 - Approche globale normative

Les données observationnelles comportementales filmées sont surtout importantes pour rendre compte de la phase de familiarisation, très révélatrice de spécificités individuelles. Mais dans toutes les phases, leur pouvoir descriptif offre un contexte permettant de comprendre le pourquoi du comportement des enfants et quelles leçons en tirer.

En complémentarité de ce cadre contextualisé, **les données informatiques** sont traitées afin d'en extraire des informations quantifiées sur les séances, les scénarios et leur performance, selon le type d'entraînement (Michou ou Lola). Outre ces informations globales, ces données permettent une analyse individuelle des paramètres de la collaboration motrice.

5.3.2 - Approche individuelle « evidence-based »

Une collaboration motrice, ou action conjointe, nécessite que soient satisfaits trois paramètres essentiels : une direction commune vers la cible, une coordination motrice, une synchronisation temporelle. Les quantifications sont fournies par les logs qui concernent la comparaison des déplacements de l'objet virtuel et de l'objet tangible. Ces logs permettent de mesurer les trois paramètres en jeu dans la collaboration motrice : 1) la synchronisation entre le partenaire virtuel et l'enfant, par la similitude temporelle des déplacements qui doivent être quasi-superposables ; 2) la précision de l'ajustement entre l'objet tangible et l'objet virtuel, par l'écart spatial entre les déplacements ; 3) l'exactitude de la direction du déplacement, qui mesure le contrôle par l'enfant de la trajectoire de l'avatar.

Les logs nous offrent la quantification et l'illustration de ces 3 paramètres. La synchronie se réfère à la coordination temporelle des individus lors des interactions sociales. Bien que la principale méthode d'évaluation reste le codage manuel (Kaur et al 2018; Zampella et coll. 2020; Scharoun et coll. 2020), diverses méthodes de calcul automatiques basées sur les données de mouvement ont été proposées (Delaerche et al 2012). Le fait que notre tâche soit une tâche « simple » (Lola ne s'adapte pas au participant, l'influence est unidirectionnelle) nous oriente vers l'utilisation de méthodes de corrélation.

Des corrélations ont été utilisées pour caractériser la synchronie dans diverses tâches effectuées par des personnes atteintes de TSA. Compte tenu de la nature linéaire de notre tâche et de l'hypothèse valable selon

laquelle l'interdépendance des deux partenaires en interaction est stable (c.-à-d. que la personne A influence toujours la personne B), une mesure de synchronisation de l'interaction totale (c.-à-d. le scénario) semble adéquate. La corrélation croisée est une corrélation globale avec un décalage déterminé (pour maximiser la corrélation) pour tenir compte d'un délai possible entre la personne A et B. Le log 'average std best lag correlation on speed' rend compte du délai temporel moyen du mouvement de l'objet tangible par rapport à l'objet virtuel.

La coordination motrice peut être caractérisée par des mesures spécifiquement liées à la tâche (Scharoun et al., 2020). Dans notre procédure, la distance spatiale entre l'objet virtuel et l'objet tangible nous fournit des informations directes sur la coordination motrice. Cette distance et sa variabilité peuvent nous éclairer sur la qualité de la coordination (*log average std distance between agents*).

En résumé, les informations concernent en premier lieu les paramètres de synchronie, mesurée par l'écart temporel entre le trajet de l'enfant et celui de l'agent virtuel, et de coordination motrice, mesurée par l'écart spatial entre le trajet de l'enfant et le trajet de l'agent virtuel. Les figures 4 et 5 donnent un exemple des informations rassemblées.

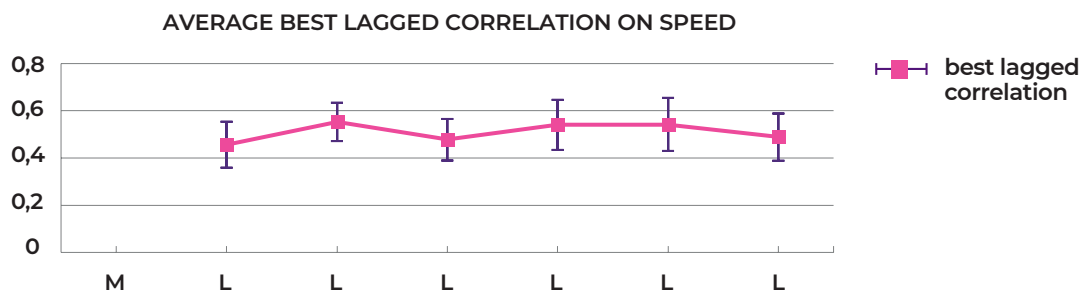


Figure 4 - Exemple d'un moyennage du paramètre de synchronie sur tous les événements de chaque séance avec Lola (L)

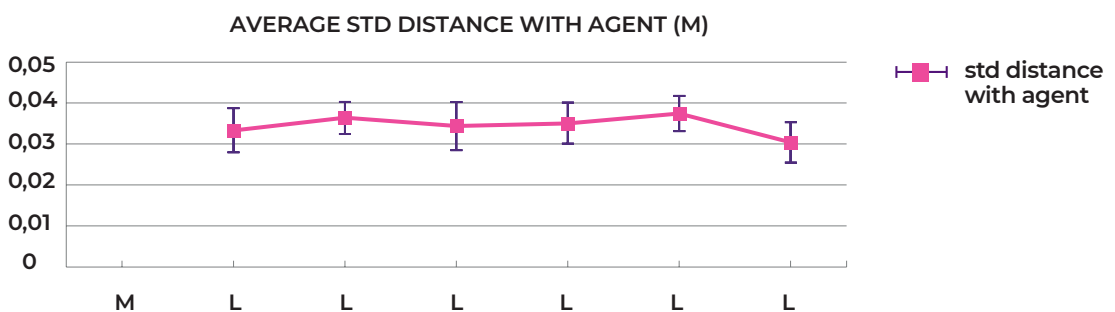


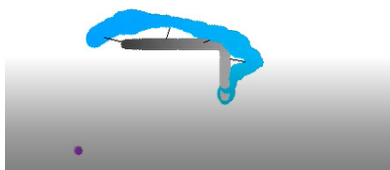
Figure 5 - Exemple d'un moyennage du paramètre de coordination motrice montrant l'écart spatial entre la trajectoire de l'objet virtuel et de l'objet tangible pour tous les événements dans chaque séance avec Lola

Les mêmes paramètres sont utilisables événement par événement et non plus en moyennage d'évènements par séance. Des vidéos des animations des mouvements enregistrés par la plateforme MIMETIC nous permettent de visualiser le déplacement de l'objet tangible (en bleu) par rapport au déplacement de l'objet virtuel (en noir). La trajectoire de l'agent est donc représentée sous la forme d'un trait noir et la trajectoire de l'enfant est représentée sous la forme d'un trait de la couleur de l'objet qu'il déplace (le trait est plus clair au début du mouvement, plus foncé à la fin). L'épaisseur du trait dépend de la vitesse de l'enfant. De fines lignes noires entre la trajectoire de l'enfant et celle de l'agent indique le lien temporel entre les trajectoires, permettant ainsi de visualiser si l'enfant anticipait ou était en retard sur le mouvement de l'agent. Cette visualisation graphique permet ainsi une analyse personnalisée des synchronies des mouvements de chaque enfant en relation avec les mouvements de l'objet.

L'exemple ci-dessous montre une relative réussite dans le respect de la direction, mais une imprécision de la coordination motrice (écart spatial important avec le trajet de Lola, et une synchronie imparfaite (l'objet tangible de l'enfant devance l'objet virtuel de Lola).

session 8 / 1 / 2020 - 15h3m49s15
task 16 - Result : SUCCESS

*Figure 6 -
exemple du trajet
d'un scénario
comparé à celui
de l'agent*



5.3.3 - Démarche normative

Les résultats sont présentés étape par étape

1. L'étape de familiarisation

L'étape de familiarisation comprend deux aspects : la familiarisation avec les lieux et le dispositif, et la familiarisation avec la procédure. La familiarisation avec les lieux et le dispositif ne se réalise pas pour le plus jeune de nos sujets (I13) qui se couche d'abord au sol, ne s'intéresse pas au dispositif, puis danse en chantant : zi... di... di

La familiarisation avec la procédure se fait donc avec 11 enfants.

Familiarisation avec la procédure

Une fois le lieu et le dispositif acceptés, la familiarisation avec la procédure peut débuter. Cette familiarisation se passe avec Michou mais sans enregistrement de la performance, le seul but étant de faire comprendre les deux contraintes de la situation : faire glisser l'objet et non le prendre, et faire adhérer l'objet réel sur sa partie virtuelle. Spontanément les enfants prennent l'objet réel en mains. Il s'agit d'abord de leur faire comprendre qu'ils ne doivent pas prendre l'objet car celui-ci doit adhérer à l'objet virtuel. Il faut ensuite qu'ils apprennent à déplacer l'objet en le faisant glisser l'objet le long de la paroi en relation avec l'objet virtuel tenu par l'avatar. Cette première étape est plus ou moins longue selon les enfants et se présente comme suit.

204 : 6 décrochés puis se met à genoux et se positionne face à Michou au 7ème essai en faisant adhérer l'objet réel au virtuel. A compris. On passe à l'entraînement avec Michou.

102 : prend 5 fois l'objet malgré les démonstrations. Tourne physiquement l'objet au lieu d'orienter le trajet à droite ou à gauche, indice de dyspraxie. 4 séances sont nécessaires.

106 : 33 essais, prend 4 fois l'objet, ensuite fait glisser 6 fois sans but, puis alterne prendre et faire glisser sans but sauf lorsqu'il s'agit du tabouret sur support du socle. 4 séances sont nécessaires.

110- 15 essais dont 8 patterns similaires 'détache, prend l'objet et le lève', malgré les démonstrations qui ne l'intéressent pas, tortille la boîte sur son cou, puis touche Michou plusieurs fois et se met au sol. 4 séances sont nécessaires pour apprendre le principe de l'adhérence.

103- 12 essais avant les cris : comprend glisser mais ne cherche pas à ce que l'objet virtuel suive, réussit à faire glisser le tabouret sur le socle mais sans référence à l'objet virtuel. L'offre d'autres séances est refusé.

201- 7 essais : prend l'objet, le déplace, soulève, ne cherche pas le contact avec le virtuel, glisse le tabouret sur le socle mais sans référence au virtuel, pourtant comprend la position de l'avatar comme indice mais ne cherche pas l'adhérence, supporte mal que l'objet tienne seul en l'air, ne supporte pas que le tabouret ne touche pas la table, crie et sort. L'offre d'autres séances est refusée.

109- 10 essais : comprend dès la démonstration qu'il faut adhérer au virtuel mais perd l'adhérence en route. Au 3^{ème} essai, glisse. Essais suivants : essaie de retrouver le contact en tournant la boîte, se met à genoux ou debout,

semble prendre la mesure main dirigée vers la paroi. Au dixième essai a définitivement compris : on passe à l'entraînement.

105- 5 essais : prend d'abord, puis fait glisser mais sans objectif et en soulevant ou tournant la boîte, a compris le contact. Au 6^{ème} essai, a compris glisser : on passe à l'entraînement.

111- 7 essais : comprend tout de suite glisser mais décroche à chaque fois, très concentré, recommence. Au 7^{ème} essai parvient à glisser sans décrocher : on passe à l'entraînement.

112- 21 essais infructueux : détache l'objet et le prend à chaque fois, même lorsque l'essai a été amorcé et qu'il glisse un peu. Il y a une grande impulsivité, l'inhibition du pattern 'prendre' est très difficile bien que la contrainte soit comprise.

108- 5 essais : l'adhérence est comprise mais ne s'intéresse pas à la collaboration motrice, fait des empilements en hauteur et regarde les scores.

Résultats

Au total, 126 essais concernent globalement cette phase de familiarisation. Dans le tableau 3 ci-dessous, nous présentons la répartition globale des séances par sujet selon les étapes de l'entraînement.

Sur les 11 enfants sollicités, 2 enfants avec TSA sévère ne souhaitent pas continuer après avoir essayé la procédure, l'un excédé de ne pas réussir l'adhérence lors de la deuxième séance de familiarisation, l'autre contrariée dès la première séance de familiarisation, dans ses principes rigides d'organisation spatiale (le tabouret doit toucher la table, la boîte ne peut pas tenir en l'air sur la cloison). C'est donc le dispositif lui-même qui contrevient aux aspirations de ces enfants. On retiendra que les intérêts restreints, la rigidité et les stéréotypies peuvent écarter certains enfants du dispositif. Toutefois dans un cadre d'entraînement moins contraint qu'une étude expérimentale, on pourrait sans doute adapter le dispositif à certaines dispositions de l'enfant. Il en est de même pour un enfant dyspraxique qui tourne l'objet physiquement au lieu de virer à droite ou à gauche sur la cloison. Il ne comprend pas le pattern moteur de 'glisser' ou sa pertinence dans la situation. Pourtant il salue l'avatar et l'agentivise d'emblée. Malgré de nombreux essais et en dépit de son bon niveau cognitif, il ne parvient pas à se familiariser avec le dispositif. Il s'agit d'un enfant qui a de grosses difficultés de discrimination spatiale : au-dessus, au-dessous, à droite, à gauche. Le travail à réaliser pour l'amener à faire glisser un objet selon une orientation donnée pourrait durer des semaines et le résultat n'est pas garanti. Notre plate-forme ne convient pas pour l'instant à ce type d'enfants,

ou, encore une fois, il faudra éviter pour lui, dans un cadre positif, d'éviter les trajets impliquant un changement de direction. L'information donnée par ce type de problème est en tout cas d'un grand intérêt pour un travail de psychomotricité précis et ciblé.

Enfant	Familiarisation	Michou	Lola	Généralisation
109 NV	1	1	4	1
204 V	1	1	8	-
111 V	1	1	11	-
105 V	1	3	3	-
106 V	4	7	-	-
110 NV	4	4	-	-
102 NV	4	1	-	-
112 V	1	3	-	-
108 V	1	1	-	-
103 NV	2	-	-	-
201 V	1	-	-	-
113 NV	0	-	-	-
Total = 73	23	22	26	1

Tableau 3 - Nombre de séances par enfant pour les différentes étapes d'entraînement

Deux groupes se dessinent : ceux qui comprennent les deux contraintes et s'exercent à les prendre en compte, et ceux qui exercent leurs objectifs propres. On verra avec Michou que ce groupe est aussi bien composé d'enfants non verbaux que d'enfants un peu langagiers. Le langage a un effet sur la compréhension des contraintes de la tâche puisque 6 des 7 enfants avec un petit langage passent à l'entraînement avec Michou après une unique séance de familiarisation, tandis qu'un seul enfant non verbal atteint ce critère. Le septième enfant un peu langagier n'a pas compris d'emblée l'objectif. Il faudra 4 séances de familiarisation pour que ce comportement laisse place à la familiarisation attendue. Son comportement est intéressant à décrire car dès sa première confrontation avec la plate-forme, il s'intéresse à l'agent virtuel et chante : « Tête, épaule, mains, pieds », en touchant Michou sur ces différents segments anatomiques. Il le touche et le caresse à maintes reprises. Donc il s'agit bien d'un interlocuteur pour lui, mais en revanche la tâche est subalterne, et plus encore la tâche de collaboration. Avec cette remarque, on touche à la question de l'agentivité de l'agent, problème crucial

en méthodologie virtuelle. On verra qu'au fur et à mesure de l'entraînement tous les enfants un peu langagiers et deux enfants non verbaux, soit 9 enfants sur 11 cherchent l'agent virtuel en essayant de passer derrière l'écran, ou en s'aplatissant au sol, ou en essayant d'ouvrir la porte de la cabine : il y a anthropomorphisation de l'agent et c'est un point crucial en faveur du dispositif pour simuler une collaboration motrice. Un dernier point qui est une autre bonne surprise : les 11 enfants ayant réalisé une familiarisation, qu'elle soit réussie ou échouée, ont choisi l'objet à déplacer en fonction de l'objet virtuel tenu par l'agent virtuel. Ceci aussi est très encourageant car il s'agit de la base à partir de laquelle un apprentissage peut prendre place : l'objectif commun de la collaboration est compris.

Ce qu'il faut retenir de la phase de familiarisation

- > *L'accès au langage accompagne une plus rapide familiarisation avec les contraintes de la tâche*
- > *L'anthropomorphisation de l'agent virtuel, la recherche de sa localisation, concerne 9 des 11 enfants ayant réalisé une familiarisation. Il s'agit d'une indication très positive en faveur d'une bonne adéquation du dispositif à son objectif : entraîner la collaboration motrice avec un partenaire*
- > *Les 11 enfants ayant essayé le dispositif choisissent comme objet réel à déplacer celui qui correspond à l'objet virtuel tenu par l'avatar : ceci indique que, quel que soit le niveau de l'enfant, cette base d'une collaboration motrice est présente chez les enfants avec TSA, même ceux qui présentent de graves dysfonctionnements.*

2. Entraînement avec Michou

L'entraînement consiste à réaliser les 4 scénarios avec Michou en suiveur. Pour que Michou suive, il faut réaliser l'adhérence entre l'objet réel et l'objet virtuel. Cet aspect a été entraîné durant la phase de familiarisation mais même ceux qui franchissent cette étape peuvent faire des décrochés. Certains enfants n'arrivent pas à réaliser l'adhérence virtuel-réel, ou encore la réaliser en continu : c'est le cas d'un enfant dyspraxique, bloqué lorsque le trajet implique de tourner car au lieu de dévier la trajectoire de l'objet, il tourne l'objet. Deux enfants ont très bien compris qu'il est nécessaire de faire adhérer l'objet à la paroi, mais ce qui est inquiétant c'est qu'ils font adhérer morphologiquement l'objet au reflet : or c'est efficace mais cela met Michou entre parenthèses. Le training devient une recherche de précision dans le placage du reflet virtuel de l'objet réel ! Nous avons déjà noté lors de l'étude d'usage avec les plus jeunes des enfants contrôle que la tâche peut être

comprise comme une activité motrice et non une activité de collaboration motrice. Le rôle des professionnels est fondamental pour rappeler que Michou est un partenaire et qu'on déplace l'objet avec lui, c'est à dire en remettant un contexte dans l'action. Par ailleurs, l'objet se détache d'autant plus fréquemment que l'on se situe dans une lutte anti-gravifique (script1 : hisser la boîte du tabouret jusqu'à la table : c'est lourd !). Inversement le script 2 (faire glisser le tabouret à droite de la table) est le mieux réussi parce qu'il n'y a pas de lutte anti-gravifique, le tabouret glissant sur le support. Les scénarios sont donc de difficulté inégale. Malgré ces aléas de la tâche, 3 enfants réussissent l'entraînement avec Michou en une seule séance. Ce sont ces enfants qui parviendront à se synchroniser avec Lola quelle que soit la vitesse. La réussite rapide de l'entraînement avec Michou est donc un bon prédicteur de l'accès à la collaboration motrice avec Lola. Le tableau 4 synthétise ces éléments.

Mais comment expliquer la difficulté rencontrée par les autres enfants à réussir l'entraînement avec Michou ? La variable langage n'est pas décisive pour la réussite puisque sur les 7 enfants qui ont un petit langage conversationnel, 3 seulement aboutissent à la réalisation des 3 tâches Lola, alors que parmi les 5 non verbaux, un réussit parfaitement et complètement les 3 tâches Lola avec un apprentissage préservé 3 semaines après l'arrêt de l'entraînement (S109).

Essais / Sujets	N ^{bre} Total de scénarios	N ^{bre} scénarios Michou	N ^{bre} scénarios Lola
109 (NV)	133	12	121*
111 (V)	183	6	177
204 (V)	122	4	118
105 (V)	68	28	40
106 (V)	31	31	0
110 (NV)	15	15	0
112 (V)	14	14	0
102 (NV)	6	6	0
108 (V)	1	1	0
103 (NV)	0	0	0
201 (V)	0	0	0
113 (NV)	0	0	0
TOTAL	573	117	456

* Réussite totale des scénarios Lola pour les 3 vitesses

Tableau 4 - Nombre total de scénarios par enfant et leur répartition selon le partenaire virtuel

Ce qu'il faut retenir de l'entraînement avec Michou

- > Les réussites les plus rapides à l'entraînement avec Michou sont des prédicteurs d'une bonne synchronisation avec Lola : il y a donc dans la prise en compte de l'adhérence réel-virtuel le germe de la capacité à s'adapter à la vitesse de l'autre.
- > Toutefois l'adéquation réel-virtuel peut se réaliser comme un placage physique sans prise en compte du partenaire virtuel
- > En modulation de ce point, on remarque une recherche du personnage virtuel chez la plupart de nos enfants. Tout se passe comme si la tâche de déplacer ensemble comprenait deux parties dissociées : la présence d'un partenaire d'une part, et le déplacement en adhérence de l'objet réel avec le virtuel d'autre part. Question : le déplacement ensemble d'un objet mi-réel mi-virtuel est-il bien compris comme la simulation d'une collaboration motrice ?

3. Entraînement avec Lola

Comme déjà indiqué ici-dessus, le véritable test des capacités de synchronisation sur le mouvement de l'autre est le port d'objet avec l'avatar Lola. Lola est autonome. C'est elle qui choisit quel objet déplacer, la cible du déplacement (c'est à dire où le poser), et à quelle vitesse. Pour suivre l'avatar, il faut donc analyser :

- 1 - la position de départ, qui informe sur l'objet d'intérêt (le tabouret, la table ou la boîte)
- 2 - la posture, qui informe sur la cible et indique la trajectoire du déplacement (à droite, à gauche, en haut, en bas)
- 3 - la vitesse pour rester synchrone. Trois niveaux de synchronie sont proposés : Lola en vitesse optimale, Lola rapide, Lola lente. Ces trois protocoles de synchronie ont été conçus pour être de niveau de difficulté croissante et se sont avérés tels.

Nous avons analysé le rapport entre le nombre de scénarios réussis sur le nombre total de scénarios pour les 4 enfants qui coopèrent avec Lola. Ce rapport s'exprime par un indice compris entre 1 pour une réussite totale et 0 pour un échec total. On peut le comparer avec le même indice concernant Michou. Le tableau 5 montre une baisse de l'indice pour Lola comparé à Michou, mais la baisse est très spectaculaire pour l'enfant 204, très investie, s'adressant à Lola pour l'inciter à agir ('Allez Lola, !'), mais en grande difficulté quand il s'agit de se synchroniser avec la vitesse rapide et plus encore avec la vitesse lente.

Enfants	Michou		Indice	Lola		Indice
	SR	NS		SR	NS	
109	11	12	0,91	46	121	0,38
111	14	22	0,63	41	194	0,21
204	4	4	1	23	118	0,19
105	8	28	0,28	4	40	0,10

Tableau 5 - Indice de réussite global par enfant pour les séances Michou et Lola

SR : Scenarios réussis

NS : Nombre de scenarios

Ce qu'il faut retenir de l'entraînement avec Lola

> Prendre en compte la position de Lola par rapport à un objet (cf. mains tendues vers l'objet) et choisir l'objet tangible correspondant, est acquis d'emblée par les 4 enfants (de même d'ailleurs par tous les enfants durant la phase de familiarisation).

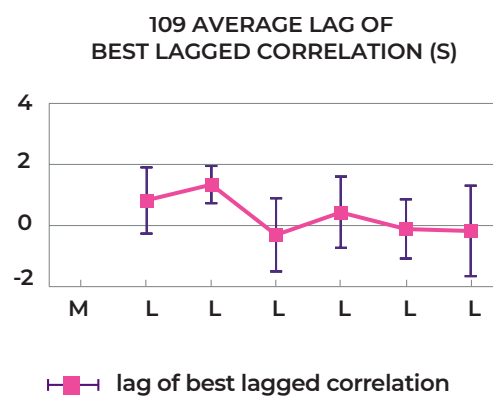
> Comprendre la direction choisie par Lola en fonction de sa posture (tournée vers la cible) est réalisé d'emblée par les 4 enfants qui collaborent avec Lola : ce n'est pas de l'attention conjointe mais c'est déjà une compréhension du fait que la posture renseigne sur une intention motrice.

> Ajuster sa vitesse à celle de Lola. Cette démarche est facilitée lorsque la vitesse est optimale, c'est-à-dire correspond à celle utilisée spontanément par l'enfant pour collaborer avec Michou. Dans ce cas, il s'agit juste de synchroniser son déplacement avec celui de Lola. En revanche les choses se compliquent lorsque Lola accélère le rythme. L'enfant 109 y parvient dès la deuxième séance avec Lola. Pour les autres, il faut plus d'essais et plus de séances. En ralenti, seul l'enfant 109 se montre capable de freiner son rythme propre dès la première fois. L'enfant 111 a besoin de beaucoup d'essais pour y arriver et l'enfant 204 ne parvient pas à gérer son impulsivité.

> Attribuer de l'agentivité au personnage virtuel. Une enfant prend en compte explicitement la présence de l'avatar. Elle dit 'Allez Lola !' 'Vas-y Lola', ce qui ne signifie pas qu'elle s'adapte au rythme et à la cible de Lola, mais qu'elle la comprend comme une partenaire. Les 3 autres enfants ayant réussi des scenarios avec Lola cherchent l'avatar en regardant sous la plate-forme ou en passant derrière, ou même en essayant d'ouvrir la cabine. Plusieurs enfants verbaux qui ne s'intéressent pas à la tâche cherchent aussi les agents virtuels dans l'espace de la pièce. Par-delà ces indications directes d'une anthropomorphisation des avatars, nos quantifications d'évènements individuels par l'intermédiaire des logs attestent de l'attribution d'une intention motrice à Lola.

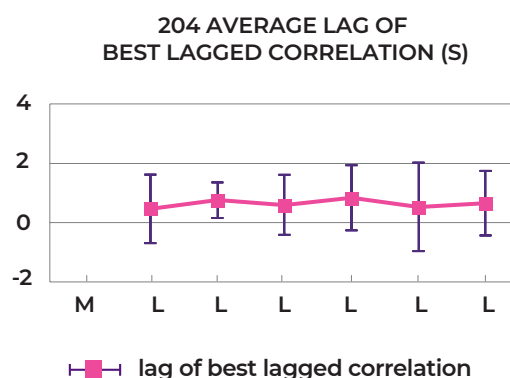
L'analyse des paramètres de la collaboration avec Lola peut nous en apprendre davantage sur la cause du décalage dans l'indice de réussite selon les enfants. apprendre davantage sur la cause du décalage dans l'indice de réussite selon les enfants.

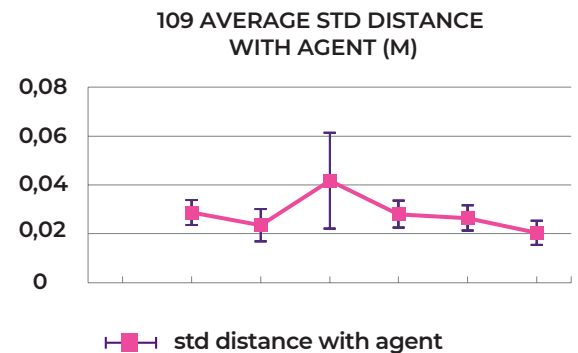
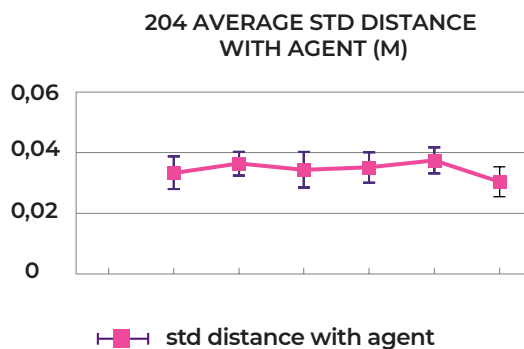
Le log 'average std best lag correlation on speed' rend compte du délai temporel moyen du mouvement de l'objet tangible par rapport à l'objet virtuel. Il nous informe sur la synchronie. L'enfant 204 a cumulé les échecs avec Lola et son indice global de synchronie à chaque séance est toujours supérieur à 0 : 204 devance Lola au lieu de se synchroniser. Ceci est vrai pour toutes les séances (0,4 0,8 0,5 1 0,4 0,6).



Si l'on compare la performance de **synchronie** de l'enfant 204 avec celle de l'enfant 109, on remarque que celui-ci rectifie à partir de la troisième séance et trouve une stratégie lui permettant d'être bien synchronisé pour la suite des séances (1, 1,8 0 0,1 0 0).

Dans notre procédure, la **distance spatiale** entre l'objet virtuel et l'objet tangible nous fournit des informations directes sur la coordination motrice. Cette distance et sa variabilité peuvent nous éclairer sur la qualité de la coordination (*log average std distance between agents*). L'enfant 204 reste distante de l'agent virtuel tandis que l'enfant 109 qui marque une contre-performance à la troisième séance, avec le début de la vitesse rapide promue par Lola, opère une réorganisation qui le mène à un faible écart de trajet par rapport à Lola.





Limite des résultats moyennés

Les informations sur les échecs et réussites nous donnent un ordre de grandeur sur les progrès des enfants : ceux-ci devraient se manifester par une progression des réussites à chaque séance. Cependant les séances ne sont pas équivalentes si l'on se souvient que la collaboration avec Lola est plus ou moins facile selon la vitesse qu'elle adopte pour déplacer l'objet virtuel : la vitesse peut être optimale (c'est-à-dire la vitesse de l'enfant, déduite de son rythme spontané pendant les interactions avec Michou), ou bien elle peut être plus rapide, ou bien elle peut être plus lente. Les difficultés diffèrent et par exemple le sujet 204 qui avait réussi avec la vitesse rapide n'a pas pu, dans le nombre de séances imparties, apprendre à contrôler ses mouvements pour s'adapter à la lenteur de Lola. L'inhibition motrice demandée pour s'adapter à un rythme lent tout en conservant la direction du déplacement et l'adhérence à l'objet virtuel représente une réelle difficulté dans le cas d'autisme où le déficit de contrôle moteur est un symptôme cardinal (Fournier et al., 2010).

En outre, les scénarios ne présentent pas tous le même degré de difficulté. Le scénario le plus facile est de déplacer le tabouret vers la table car le tabouret n'a pas à être soulevé. Le scénario le plus difficile est celui où l'on doit faire glisser la boîte en hauteur sur la paroi et poser la boîte sur la table ; dans ce cas le travail musculaire contre la pesanteur est à son maximum. On ne peut donc pas être renseigné précisément sur les qualités de la collaboration de l'enfant avec l'agent Lola en sommant les scénarios d'une séance. Il faut analyser scénario par scénario et sujet par sujet.

Si l'on suit le traitement d'un scénario selon la séance, et mieux le même type de scénario séance après séance, il est possible de capter les progrès de synchronie et de précision motrice réalisés grâce à l'entraînement, comme le montrent ces exemples issus du protocole de l'enfant III.

session 8 / 1 / 2020 - 15h3m49s15
task 16 - Result : SUCCESS

ID 111
session 17 / 1 / 2020 - 16h38m44s518
task 3 - Result : SUCCESS

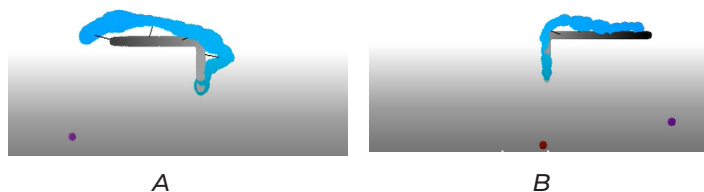


Figure 8 - progression de l'enfant L111 au cours de son entraînement

*A - La direction est respectée mais l'enfant L111 précède Lola et n'est pas précis
B - L'enfant suit Lola en adoptant son rythme, sans la devancer et avec beaucoup de précision*

Nous avons le projet de réaliser cette approche micro-analytique dans un cadre evidence-based ciblé sur la recherche d'une signature motrice référée à la synchronie et la coordination motrice pour les 4 enfants qui ont collaboré avec Lola. Rechercher une signature motrice sur la base de ces deux paramètres nous paraît une piste intéressante. Mais ce travail est de longue haleine et dépasse le temps imparti pour réaliser le projet dont il représentera la suite à terme.

5.4 - RECOMMANDATIONS AU REGARD DES RÉSULTATS

Les résultats et leurs limites nous suggèrent des questions auxquelles nous répondons sous la forme de plusieurs recommandations

5.4.1 - Que faire pour faciliter la familiarisation avec la plate-forme ?

L'échec de la familiarisation avec la plate-forme ou de l'entraînement avec Michou pour 5/12 de nos enfants nous mène à plusieurs propositions. Tout d'abord on peut essayer de proposer sur tablette une simulation filmée de la procédure. La procédure serait découpée en étapes séparées par une période blanche de 10 secondes. Nous avons envisagé ce dispositif mais l'avons écarté du fait de la difficulté pour certains enfants à repérer la similitude entre le dispositif visualisé en 2 dimensions et le dispositif réel.

Une autre proposition consiste à faire tout d'abord porter les objets tangibles pour familiariser l'enfant avec le déplacement de l'objet. Toutefois, comme nous avons pu le constater, ce préalable peut tourner à l'inconvénient car l'enfant n'apprend pas la nécessité de faire adhérer l'objet tangible sur la paroi et de le faire correspondre à l'objet virtuel. Au contraire, il est confirmé dans le geste intuitif de prendre l'objet.

Les contraintes spécifiques de la plate-forme virtuelle sont de faire glisser l'objet le long de la paroi pour le transporter avec l'avatar, et non de le prendre : c'est en quelque sorte contre-intuitif et représente la difficulté majeure de la familiarisation. A cette difficulté s'ajoute la nécessité de lutter contre la pesanteur liée à l'aimantation de l'objet dont le caractère tangible se manifeste par la résistance à la poussée. Lorsqu'il faut déplacer l'objet en l'élevant, le travail contre la pesanteur est à son summum et explique des échecs et des découragements. Une amélioration a été réalisée pour rendre le glissement plus aisé. Mais même dans ce cas, il peut rester une incompréhension de la situation : *pourquoi faire glisser ce que l'on peut porter d'un point à un autre ?*

Devant l'échec de la situation mimée pour les enfants de très faibles capacités de fonctionnement, il nous semble important de traiter l'étape de la familiarisation de façon complètement individuelle. Ainsi une enfant verbale de notre population a fait une crise violente en constatant que l'objet réel peut rester suspendu à la paroi par adhérence : la causalité physique qui fait comprendre que les objets chutent s'ils ne sont pas tenus était mise en question et provoquait une réaction de peur panique que nous n'avions pas anticipée.

5.4.2 - Comment gérer les intérêts interférents ?

D'autres aspects du dispositif peuvent perturber des enfants de plus haut niveau et leur faire perdre l'objectif initial, en déviant vers des intérêts interférents. Grandin a bien identifié comment une sensation pendant une action peut faire changer l'objectif en cours (Grandin, 1995). Ainsi trois de nos enfants avec langage se sont focalisés sur l'indication des réussites et des échecs, comptant les scores. L'enfant 108 ne regardait que ce tableau, négligeant l'avatar et les objets à changer de place, tandis que l'enfant 112 provoquait des scores en essayant divers comportements inadaptés à la tâche mais adaptés à anticiper un changement de scores. Quant à l'enfant 105, ses performances n'ont fait que décroître car il recherchait les étoiles-récompenses, le nez en l'air (Figure 2).

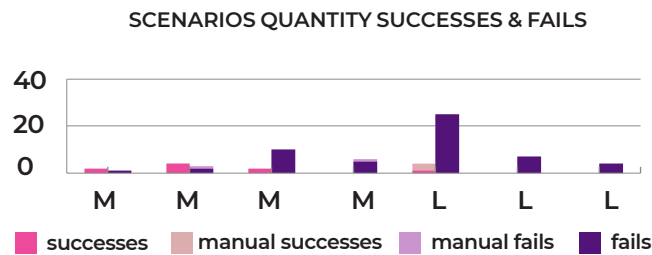


Figure 2 - Exemple d'une performance qui décroît en raison d'un objectif détourné (M : Michou, L : Lola)

Rien ne pouvait les ramener à la tâche et d'une séance sur l'autre ils se confirmaient dans leurs objectifs détournés. Cela nous permet de constater que, malgré les précautions prises et le caractère épuré du dispositif, l'environnement était encore trop riche de possibles distracteurs de l'attention. Cet élément de connaissance des résultats perturbait d'une autre façon l'enfant III, bien concentré sur l'objectif et qui réagissait par le désappointement à chaque fois qu'un score négatif s'ajoutait (*j'ai mal au cœur*), malgré nos efforts pour dédramatiser la situation et valoriser tout essai, qu'il soit ou non un succès. Il est souhaitable que ce tableau n'apparaisse plus sur la plate-forme, et l'équipe d'informaticiens a pris note de cette nécessité pour la réalisation finale du logiciel.

1 - Le dispositif nous a ménagé de bonnes surprises avec nos enfants non verbaux et de niveau cognitif modeste : quelles sont-elles et comment les mettre à profit dans un entraînement ou une thérapie ?

Tout d'abord, la meilleure performance est le fait d'un enfant non verbal. Le langage n'est donc pas une compétence-clé dans notre dispositif. Avec nos paramètres de synchronie et de coordination motrice mesurés par des écarts temporels et spatiaux entre la performance de l'agent virtuel et la performance de l'enfant, nous décrivons l'essentiel de ce qui est nécessaire pour une collaboration motrice, et cet enfant en est capable, de même que trois autres, dotés de quelques moyens langagiers limités. La synchronie motrice apparaît comme au cœur d'un entraînement à la collaboration.

Ensuite il apparaît que les indices corporels tels que la direction de la tête et du buste de l'agent virtuel permettent la localisation d'une cible. Il y a beaucoup à faire en prenant en compte ce constat. En utilisant de tels indices corporels on peut apprendre à ces enfants comment prendre en compte l'autre pour explorer des lieux, des cibles, des buts, et parvenir progressivement à l'attention conjointe, de façon efficace car liée à des bénéfices fonctionnels immédiats.

Enfin, les échecs même sont informatifs. L'enfant qui ne regardait que le compteur renseignant sur les scores, et oubliait que ces scores sont un effet du contrôle moteur, nous rappelait l'importance d'un milieu dépouillé de tout ce qui ne concerne pas l'objectif à poursuivre. L'enfant qui tournait l'objet au lieu de le faire changer de trajectoire nous incitait à comprendre que l'organisation spatiale est d'abord celle du corps en interaction avec le milieu physique. L'enfant qui ne tolérait pas que le tabouret ne soit pas en contact étroit avec la table nous faisait comprendre que l'installation la plus simple est déjà une organisation qui peut choquer certaines structures mentales. De la diversité de notre population émergent les limites mais aussi la flexibilité de notre dispositif. Cette flexibilité peut être dirigée par le professionnel pour réaliser des entraînements *à la carte*, totalement pensés pour l'enfant auquel on veut faire acquérir la précision de la coordination motrice sachant qu'il maîtrise la synchronie, ou inversement, ou bien pour l'enfant qu'il faut conduire vers la compréhension de la posture de l'autre comme désignant un but.

VI - PRÉSENTATION DÉTAILLÉE DES SUPPORTS D'APPLICATION DÉVELOPPÉS AU REGARD DES RÉSULTATS ET DES RECOMMANDATIONS

Les supports d'application sont les suivants (ils sont disponibles sur le site <https://mimetic.limsi.fr/> ou sur demande par email à martin@limsi.fr).

État des lieux de la littérature : «Collaboration motrice et trouble du spectre de l'autisme» : Cet état des lieux (79 pages) comporte une synthèse et des fiches de lecture sur les thèmes suivants : a) autisme et action motrice à deux : concepts, capacités impliquées, dispositifs et résultats, b) Autisme et technologies interactives : des éléments pour une action motrice en interaction humain-machine (IHM), et c) Autisme et entraînement de l'action motrice individuelle et à deux par des technologies interactives.

Étude des besoins : Ce livrable commence par identifier les bénéficiaires qui sont tout d'abord les personnes qui vont utiliser le logiciel pour l'entraînement à l'interaction sociale collaborative et à l'apprentissage moteur dans le trouble du spectre de l'autisme (TSA). Le logiciel est donc destiné aux personnes avec TSA, en premier lieu des enfants, mais aussi des adolescents. Nous y décrivons aussi la manière dont nous avons impliqué dans cette étude des besoins les parents des enfants, les associations de parents et des adultes de haut niveau ; les professionnels, psychologues,

psycho-motriciens et éducateurs.

Logiciel : prototype Universitaire exploitable par des informaticiens : le logiciel est un projet Unity sous Windows 10.

Données recueillies : nous y décrivons les données de mouvements enregistrées automatiquement par la plateforme, le logiciel de visualisation des données de mouvement, des exemples de données de mouvement enregistrées automatiquement par le système, et le déroulement de l'enregistrement des fichiers de logs par la plateforme.

Protocole et évaluations : ce livrable rappelle les objectifs de la plateforme puis décrit les trois étapes du protocole (la familiarisation, l'entraînement à déplacer l'objet avec l'agent qui suit l'enfant, puis l'entraînement à suivre l'agent qui agit de façon autonome), ainsi que les résultats des évaluations avec 11 enfants (résultats globaux et événements individuels).

Bibliothèque d'actions motrices collaboratives : ce livrable comporte 15 vidéos où deux adultes neurotypiques déplacent des objets réels (avec et sans commentaire audio explicatif) ainsi que 13 vidéos dans lesquelles un adulte utilise la plateforme (ces vidéos ont été filmées par TEDyBEAR (Justin Malleret, Aurélie Cherrier, Jacqueline Nadel) (les vidéos ne sont pas accessibles directement sur le site web : contacter MARTIN@LIMSI.FR pour y avoir accès)

Guide de formation à l'usage des aidants : ce livrable est destiné notamment aux aidants intéressés par l'utilisation d'entraînement aux actions conjointes avec des enfants avec Trouble du Spectre de l'Autisme, notamment avec un dispositif comme la plateforme MIMETIC. Ce guide rappelle les objectifs de la plateforme et explique comment adapter le protocole aux spécificités de chaque enfant.

Actions de vulgarisation et communications : ce rapport liste les actions de vulgarisation et plus généralement de communications autour du projet.

Vidéo de présentation du projet : ce film a été réalisé par la société Créalis Medias.

Support de formation : ce livrable (powerpoint et vidéo) est destiné notamment aux aidants intéressés par l'utilisation d'entraînement aux actions conjointes avec des enfants avec Trouble du Spectre de l'Autisme.

VII - ÉVALUATION

Nos critères d'évaluation suivent les phases de la réalisation d'un dispositif d'entraînement à la collaboration motrice sur la base d'une interaction entre un enfant avec autisme et un partenaire virtuel. Ils prennent en compte les objectifs initiaux du projet et les comparent à ce qui a pu être réalisé.

Notre premier objectif était la réalisation d'un dispositif présentant une tâche accessible à des enfants avec TSA de modeste niveau cognitif, peu verbaux, voire non verbaux, et présentant un autisme modéré à sévère. Une réalisation optimale impliquait un dispositif dépouillé de distracteurs mais néanmoins attractif, des agents référençables comme humains bien que schématiques, la conception d'objets tangibles jumeaux des objets virtuels de façon à garder l'impression de réalité concrète, nécessaire pour des enfants limités dans leur conception du symbolique.

Cet objectif a été testé avec des enfants typiques puis des enfants avec TSA. Nous avons constaté la prise en compte de l'objet tangible et la capacité de la plupart des enfants à comprendre la nécessité de réaliser un tout entre l'objet virtuel et l'objet, ainsi qu'une attractivité pour les agents virtuels, anthropomorphisés par la grande majorité des enfants avec TSA.

Le deuxième objectif était que le dispositif soit complètement dénué de risques lors de son maniement, compte-tenu des spécificités de l'autisme qui peuvent conduire ces enfants à se mettre en danger. Nous n'avons relevé aucun problème inhérent au dispositif, aucun problème de sécurité durant les séances et les 700 essais (699 exactement) réalisés.

Le troisième objectif était que les composants soient gratuits ou d'accès libre afin qu'ils soient récupérables par d'éventuels professionnels intéressés à reproduire le dispositif, gratuitement présenté sur le site de la FIRAH ainsi que tous les logiciels clé en main. Cet objectif est pleinement réalisé.

Le quatrième objectif était qu'il soit de maniement simple pour les professionnels. Cet objectif qui a fait l'objet de va-et-vient entre l'équipe de psychopathologie et les informaticiens, est pleinement réalisé puisque nous avons pu constater qu'un changement d'expérimentateur se réalisait facilement au centre médicosocial TEDyBEAR dans lequel s'est déroulée l'étude expérimentale de la capacité du dispositif à induire la collaboration motrice.

Le cinquième objectif était de le tester sur la population la plus hétérogène possible pour avoir des retours sur sa compatibilité avec des troubles sévères et une déficience mentale associée. Cet objectif contrevient aux

pratiques habituelles en recherche qui tendent à réduire l'hétérogénéité de la population pour réduire le nombre de variables non contrôlées. Mais il a un objectif clair. En effet nous déplorons le faible intérêt porté à cette population dans les dispositifs numériques et nous voulions mettre cet outil à la disposition de ces enfants oubliés. Une telle option est un défi et nous aurions pu nous orienter sur une population sélectionnée qui ressemble à nos trois enfants un peu langagiers. Si nous avions opté sur cette sélection, nous n'aurions pas découvert qu'un enfant non verbal est parfaitement capable de maîtriser la tâche et de la réussir mieux que les autres enfants. Nous considérons qu'ainsi nous avons pleinement rempli notre objectif principal, même si c'est aux dépens d'une démonstration plus spectaculaire des capacités du dispositif.

Il reste maintenant à déplorer que nous n'ayons pas pu réaliser le « carré latin » de populations prévu au départ : jeunes enfants avec TSA de faible niveau cognitif, adolescents et jeunes adultes avec TSA de faible niveau cognitif, enfants avec TSA de haut niveau cognitif, adolescents avec TSA de haut niveau cognitif, tel était le plan de recrutement initial. Les circonstances particulières de notre travail, d'abord entravées par un grave accident de notre post-doc, principal réalisateur de la plate-forme, qui en a retardé la livraison, puis par les grèves des transports du dernier trimestre 2019 qui ont gêné le recrutement régulier de nos enfants, puis le confinement de mi-Mars à Juin, nous ont obligés à renoncer à notre plan initial. De même nous n'avons pas pu mener le point ultime de notre étude : savoir si la collaboration motrice acquise avec l'agent virtuel a pu se généraliser à la collaboration motrice entre enfants et en famille. Comme les psychologues continuent à utiliser la plate-forme, nous comptons bien répondre ultérieurement à cette question.

Malgré ces limitations, les résultats de notre projet sont très positifs et dépassent les constats résumés dans notre présentation. En effet, ils permettent de dégager de nombreux éléments susceptibles d'ouvrir des voies pour l'apprentissage d'enfants présentant de graves dysfonctionnements sociaux, cognitifs et moteurs. Lesquels ?

Tout d'abord, on sait depuis longtemps que les enfants avec autisme sont plus à l'aise devant un partenaire sur vidéo qu'en réel, car l'interaction dans ce cas cède le pas à une perception qui ne demande pas de réponse. L'aisance, voire la sympathie de nos enfants pour nos deux personnages virtuels, encourage à utiliser le virtuel comme base de progression vers les interactions.

Plus concrètement lié aux comportements du personnage virtuel, le fait que TOUS les enfants choisissent l'objet à déplacer en référence à l'objet

choisi par l'avatar est un encouragement à exploiter cette capacité de base, pour amorcer l'entraînement à la collaboration motrice, avec ou sans plate-forme virtuelle. Un autre point d'enseignement de notre travail est la capacité de plusieurs de ces enfants à détecter la cible future du trajet de l'avatar à partir de sa posture et de la direction de sa tête. Comment ne pas y voir une base à partir de laquelle travailler l'attention conjointe plus concrètement, plus physiquement qu'on ne le fait habituellement par le pointage proximal ? Cette forme de pointage est symbolique aussi, tandis que l'orientation du corps est concrète.

VII - CONCLUSION

Notre travail a été de bout en bout un travail interdisciplinaire, non la juxtaposition ou l'addition de deux domaines de compétences, mais leur pleine intégration et leur constant dialogue : une telle option est donc possible et dépasse les objectifs que nous nous étions fixés au départ. Elle a permis de mener à bien un objectif ambitieux : celui de s'attacher au cas des enfants avec TSA les plus démunis, ceux privés de parole ou très peu capables de l'utiliser, et d'accès limité aux symboles. Elle a permis de montrer la base sociale de la motricité dans les efforts de synchronie et de coordination motrice déployés par les plus compétents d'entre eux. Elle nous a réservé la belle surprise de constater que même les plus démunis peuvent faire référence à l'autre dans leur action en choisissant le même objet. Nous avons déjà acquis cette connaissance grâce aux travaux sur l'imitation de l'une d'entre nous, mais voir se réaliser la même compétence avec un agent virtuel montre combien la voie de recherche ouverte par la réalité virtuelle offre de perspectives de recherches et d'applications concrètes concernant le domaine des interactions sociales à base motrice. C'est un petit début que nous espérons bien pouvoir enrichir et développer en extrayant plus encore des données rassemblées, et peut-être d'en rassembler d'autres dans le même objectif.

IX - ANNEXE

La liste de l'ensemble des supports d'application (avec une description de chacun d'eux et en précisant comment y accéder sur internet) et de tout autres supports ayant été réalisés pouvant aider à communiquer sur la recherche via internet (par exemple Power Point, présentations utilisées, vidéo d'une interview des partenaires de la recherche chercheurs/acteurs de terrain/personnes handicapées/familles). D'autres annexes que le porteur

de projet jugera utiles pourront être ajoutées.

L'ensemble des supports d'application est accessible sur le site web du projet : <https://mimetic.limsi.fr/> ou sur demande par email à : martin@limsi.fr

- 1** - État des lieux de la littérature «Collaboration motrice et trouble du spectre de l'autisme»
- 2** - Étude des besoins
- 3** - Logiciel: prototype Universitaire exploitable par des informaticiens
- 4** - Données recueillies
- 5** - Protocole et évaluations
- 6** - Bibliothèque d'actions motrices collaboratives filmées par TEDyBEAR (Justin Malleret, Aurélie Cherrier, Jacqueline Nadel) : nous contacter martin@limsi.fr
- 7** - Guide de formation à l'usage des aidants
- 8** - Actions de vulgarisation et communications
- 9** - Vidéo de présentation du projet : réalisé par la société Créalis Medias
- 10** - Support de formation

PROJET
MiMETIC

**Retrouvez les résultats
de la recherche sur les sites :**

<https://mimetic.limsi.fr/doku.php>

<https://www.firah.org/logiciel-pour-l-entraine-ment-combine-a-l-interaction-sociale-coopera-tive-et-a-l-apprentissage-moteur.html>