

RÉPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union – Discipline – Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur & de la Recherche Scientifique



N° d'ordre : 130/2022

THÈSE

En vue de l'obtention du
Doctorat de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny

Mention : Informatique
Spécialité : Intelligence Artificielle & Robotique

THÈME

Interactions sociales avec des adolescents autistes via un jeu d'imitation gestuelle impliquant un robot assistant

Présentée et soutenue publiquement le 21 octobre 2022 par :

Linda Nanan VALLÉE

Devant l'honorable jury composé de :

M. OUMTANAGA Souleymane	Professeur titulaire Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny	Président
M. ASSEU Olivier	Professeur titulaire Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny	Directeur de thèse
Mme AGUILERA GONZALEZ Adriana	Maître de conférences École Supérieure des Technologies Industrielles Avancées	Rapporteur
M. AKA Boko	Professeur titulaire Université Nangui Abrogoua	Rapporteur
M. DIABATÉ Nabongo	Maître de conférences Université de Bouaké	Examineur

RÉPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union – Discipline – Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur & de la Recherche Scientifique



N° d'ordre : 130/2022

THÈSE

En vue de l'obtention du
Doctorat de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny

Mention : Informatique
Spécialité : Intelligence Artificielle & Robotique

THÈME

Interactions sociales avec des adolescents autistes via un jeu d'imitation gestuelle impliquant un robot assistant

Présentée et soutenue publiquement le 21 octobre 2022 par :

Linda Nanan VALLÉE

Devant l'honorable jury composé de :

M. OUMTANAGA Souleymane	Professeur titulaire Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny	Président
M. ASSEU Olivier	Professeur titulaire Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny	Directeur de thèse
Mme AGUILERA GONZALEZ Adriana	Maître de conférences École Supérieure des Technologies Industrielles Avancées	Rapporteur
M. AKA Boko	Professeur titulaire Université Nangui Abrogoua	Rapporteur
M. DIABATÉ Nabongo	Maître de conférences Université de Bouaké	Examineur

Dédicace

À mon Papa Céleste, qui est Amour, Miséricorde, et vit dans nos profondeurs intérieures.

À mon père, Ernest, qui m'a transmis le goût du travail bien fait, la spontanéité et l'humilité.

À ma mère, Solange, qui m'a transmis passion, altruisme et capacité d'organisation.

À mon cher Dibo, une personne d'exception, et à notre trésor de fils, William Eding.

À ma deuxième maman, Rébecca, pour sa pureté de cœur et sa joie de vivre.

À Mémé Louise, qui a donné tant d'amour autour d'elle, avant de nous quitter en janvier 2022.

À ma marraine, Tantie Laurence, pleine de courage et d'humour, partie début 2022, elle aussi.

À mes trois grandes sœurs, Sandrine, Nathalie et Laetitia, dont l'aînée s'en est allée trop tôt.

À mon petit-frère, mes nièces et neveux, mon premier filleul.

À tous mes parents d'esprit et de cœur, qui m'ont transmis l'Amour de DIEU et de Sa Création.

À mes chères amies et mes chers amis, avec qui nous avons tant partagé, peines et joies.

Remerciements

L'aboutissement de ces travaux de thèse a été rendu possible grâce à de nombreuses personnes de valeur, au sein de :

- L'École Supérieure Africaine des Technologies de l'Information et de la Communication (ESATIC) : son Directeur Général, Professeur KONATÉ Pascal Adama ; son Directeur de la Recherche et de l'Innovation, Pr ASSEU Pascal Olivier, Professeur à l'INPHB et directeur de la présente thèse ; les membres du LASTIC, notre laboratoire ; mon assistant de recherche et étudiant COULIBALY Fousseny.
- L'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INPHB) et son École Doctorale Polytechnique (EDP) : Pr YAO Benjamin, Directeur Général de l'EDP ; Pr ZOUEU Jérémie ; Pr BABRI Michel ; Pr KONAN Fransisco ; Pr HABA Cissé Théodore ; Dr KONÉ Gbah ; Dr SORO Doudjo ; Dr ABRO Koutouan ; Dr KONÉ Malik, dont le soutien a été si précieux dans ces fameux moments de doute rencontrés par tout chercheur.
- L'Institut Mines Télécom Atlantique (IMTA) et son École Doctorale (ED) MathSTIC : Monsieur FRIEDEL Paul, alors Directeur Général de l'IMTA ; Pr KANELLOS Ioannis ; Pr VIHO César et Pr PERSON Christian, respectivement Directeur et Directeur adjoint de l'ED ; Dr LOHR Christophe et Dr NGUYEN Mai, encadrants d'une partie de ces travaux.
- L'École Nationale d'Ingénieurs de Brest (ENIB) : Dr de LOOR Pierre, enseignant-chercheur
- Centre Winnicott du Centre Hospitalier Régional Universitaire (CHRU) de Brest : Dr LAVENNE-COLLOT Nathalie, pédopsychiatre
- Plusieurs centres spécialisés accompagnant des enfants et adolescents autistes en Côte d'Ivoire et en France : Dr MOKÉ Lambert et Monsieur SHAW Joël du Centre de Guidance Infantile de l'Institut National de Santé Publique (INSP) ; Dr BISSOUMA Anna, Directrice du Centre Marguerite Té Bonlé de l'INSP ; Madame KIEFFOLOH Miyalah, Directrice du Centre d'Aide Médico-Psycho-Sociale de l'Enfant (CAMPSE)

ainsi que l'ensemble de son personnel, dont Maîtresse Cynthia, M. KONAN et M. KOUASSI ; M. MEHANNA Marwan, M. TABOR Serge, Mesdames les éducatrices Céleste et Tina des Établissements Pavillon Royal (SESSAD, IME, MAS).

- Centres de Ressources Autisme et associations du domaine : M. MIRault Sébastien et Mme VINÇOT-ABIVEN Lila du CRA Bretagne, Mme BLANC Gwenann, leur partenaire ; ma chère Marie-Virgile KOFFI épouse KOUASSI, militant au Canada pour améliorer les conditions de vie des personnes autistes, ma chère Anne-Sophie PEYLE, faisant de même en France, avec Mme BERTHELOT Brigitte de l'ONG Autistes Sans Frontières, et tous les autres héros œuvrant en coulisses.

Mention spéciale pour les participantes et participants aux tests techniques préliminaires et aux expérimentations, ainsi que pour leurs parents ou représentants légaux : Modibo, William, Nicky, Rébecca, Sulimane, Samira, Junior, Audrey, Fabrice, Flora, Antoine, Eliott.

Par ailleurs, les techniciens de reprographie qui impriment les manuscrits de thèse des doctorants, et autres aides discrètes, constituent un support important. Merci donc à Messieurs Alfred, Modeste et Ali. Merci particulier à M. Kassoum.

Enfin, de tout cœur, je voudrais remercier les honorables Présidents et membres des jurys de comités de thèse, pré-soutenance et soutenance, en particulier :

- Pr OUMTANAGA Souleymane, Directeur du LARIT de l'INPHB, Président du jury de soutenance
- Pr AGUILERA GONZALEZ Adriana, de l'École Supérieure des Techniques Industrielles Avancées (ESTIA, France), Rapporteur
- Pr AKA Boko, de l'Université Nangui Abrogoua, Rapporteur
- Pr DIABATÉ Nabongo, de l'Université A.O. de Bouaké, Examineur

Je ne pourrais certainement pas citer ici toutes celles et tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ces travaux, mais chacune et chacun savent bien l'estime et la profonde gratitude qui m'animent.

L'expérience d'une thèse de doctorat est encore plus éprouvante lorsqu'on est jeune Maman et qu'on perd des proches en chemin, mais elle est, ô combien, enrichissante. Elle a été rendue possible grâce à DIEU et grâce à vous. Du fond du cœur, merci.

RÉSUMÉ

Les troubles du spectre autistique (TSA) sont une condition neurodéveloppementale complexe, affectant les interactions sociales, la communication et les comportements. La prévalence globale de ces troubles est estimée à 1 cas sur 160 par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Le diagnostic doit être effectué le plus tôt possible. Différentes échelles d'évaluation existent : Childhood Autism Rating Scale™, 2nd edition (CARS2), Autism Diagnostic Observation Schedule (ADOS), Autism Diagnostic Interview - Revised (ADI-R)...

Au fil des décennies, de nombreuses méthodes et techniques ont été employées pour tenter de réduire les symptômes des TSA : de l'équithérapie à la musicothérapie, en passant par des « jeux sérieux » avec des agents virtuels, ou des interventions robotiques.

Plusieurs projets et études, parmi lesquels AURORA et GOLIAH, ont montré l'impact positif de l'usage de robots sociaux et de « jeux sérieux » dans le cadre d'un programme complet d'assistance pour les enfants présentant des TSA. Très peu d'études ont porté sur des adolescents autistes.

Par ailleurs, le processus complexe d'imitation - spontanée, induite, reconnaissance d'être imité(e) – est reconnu comme un pilier des processus d'apprentissage et de communication non verbale.

Par conséquent, dans le cadre de nos travaux, nous proposons un jeu d'imitation réciproque implémenté via un robot assistant et en collaboration avec un accompagnant humain, dans le but d'améliorer les interactions sociales avec les préadolescents et adolescents présentant des TSA ainsi qu'un déficit intellectuel. Ces travaux contribuent notamment à la réalisation des objectifs du développement durable (ODD) numéros 3 (santé et bien-être) et 9 (innovation).

Avant d'implémenter des jeux éducatifs ou des sessions d'intervention robotique à l'attention de la population cible, des prérequis importants doivent être observés, notamment : l'identification des caractéristiques des participants, la définition d'objectifs clairs et d'indicateurs de succès mesurables.

Mots-clés : *interaction humain-robot (IHR), intelligence artificielle, imitation, autisme, interaction sociale*

ABSTRACT

Autism spectrum disorders (ASD) affect social interactions, communication and behavior. The global prevalence of autism is considered by the World Health Organization to be around 1 case out of 160. The diagnosis must be done as early as possible. The most common clinical rating scales are the following : Childhood Autism Rating Scale™, 2nd edition (CARS2), Autism Diagnostic Observation Schedule (ADOS), Autism Diagnostic Interview - Revised (ADI-R). Over the decades, various techniques and methods were used to attempt reducing the symptoms of autism spectrum disorder : horse-based therapy, music-based therapy, serious games involving virtual social agents, robotic interventions, etc.

Several projects and studies, among which AURORA and GOLIAH, have demonstrated a positive impact of the use of social robots and serious games within the framework of a complete assistance program for children with ASD. Very few studies focused on autistic adolescents.

Furthermore, the complex imitation process (spontaneous or induced imitation, recognition of being imitated) is known to be an important pillar for learning and non-verbal communication. Therefore, aiming at improving social interactions with mentally impaired autistic adolescents, we have decided to design a serious game that will make use of the complex imitation process and be available to play through an assistive social robot and a human educator. This will contribute to the realization of SDGs #3 (good health and well-being) and 9 (innovation).

Key requirements must be observed before designing educational games and robot-assisted sessions for people with ASD : identifying the participants' characteristics, defining clear objectives and measurable success indicators (level of joint attention through eye-tracking, responses to stimuli, quality of imitation through movement recognition algorithms).

We shall design an evolving intelligent system, able to adapt to users' profiles and behaviors.

Keywords : *human-robot interaction (HRI), artificial intelligence, imitation, autism, social interaction*

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION GÉNÉRALE	15
1.1	CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE	15
1.2	OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE	16
1.3	CONTRIBUTIONS DE LA THÈSE	17
1.4	ORGANISATION DU MANUSCRIT	18
2	CHAPITRE 1 – GÉNÉRALITÉS	20
2.1	INTRODUCTION	20
2.2	L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ET LA RECONNAISSANCE DE POSES OU GESTES	20
2.3	L'INTERACTION SOCIALE	23
2.4	L'AUTISME	24
2.5	L'INTERACTION HOMME-ROBOT	27
2.6	L'IMITATION	29
2.7	CONCLUSION DU CHAPITRE 1	30
3	CHAPITRE 2 - ÉTAT DE L'ART	32
3.1	INTRODUCTION	32
3.2	AUTISME, IMITATION ET APPRENTISSAGE	32
3.2.1	<i>Autisme et imitation</i>	32
3.2.2	<i>Apprentissage par imitation et reconnaissance de gestes</i>	39
3.3	UTILISATION DES JEUX SÉRIEUX ET ROBOTS DANS LA PRISE EN CHARGE DES TSAs	46
3.3.1	<i>« Serious games » pour enfants autistes</i>	46
3.3.2	<i>Interventions robotiques pour enfants autistes</i>	51
3.4	JEUX DE DONNÉES UTILES EN INTERACTION HUMAIN-ROBOT	60
3.5	CONCLUSION DU CHAPITRE 2	62
4	CHAPITRE 3 - PROBLÉMATIQUE, HYPOTHÈSES ET MÉTHODOLOGIE	64
4.1	INTRODUCTION	64
4.2	PROBLÉMATIQUE ET HYPOTHÈSES	64
4.3	APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE	65
4.3.1	<i>Population cible</i>	66
4.3.2	<i>Questionnaires, canevas de séances et protocoles de consentement</i>	66
4.3.3	<i>Environnement, durée et rythme des séances</i>	68
4.3.4	<i>Jeux de données (datasets)</i>	69
4.3.5	<i>Description des phases expérimentales</i>	70
4.3.6	<i>Description synthétique de la structure du jeu d'imitation</i>	76
4.3.7	<i>Justification du choix du robot</i>	83
4.3.8	<i>Justification du choix des paramètres mesurés et des critères d'évaluation</i>	88
4.4	MÉTHODE DE CALCUL DU NIVEAU D'INTERACTION SOCIALE	93
4.5	CONCLUSION DU CHAPITRE 3	96
5	CHAPITRE 4 – SIRIA, UN SYSTEME SOCIAL, INFORMATIQUE ET ROBOTIQUE VISANT À SUSCITER DES INTERACTIONS AVEC DES PERSONNES AUTISTES	98
5.1	INTRODUCTION	98
5.2	DESCRIPTION GÉNÉRALE DU SYSTÈME PROPOSÉ	98
5.3	DESCRIPTION DÉTAILLÉE DE LA PARTIE VISIBLE DE SIRIA	100
5.4	DESCRIPTION DÉTAILLÉE DE LA PARTIE NON VISIBLE	103
5.5	DESCRIPTION DÉTAILLÉE DES FONCTIONS PRINCIPALES DE SIRIA	110
5.5.1	<i>Détail de la fonctionnalité de détection de squelette</i>	110

5.5.2	<i>Implémentation des phases de salutations, pairing et clôture</i>	112
5.5.3	<i>Démonstration de gestes consigne et incitation du participant</i>	113
5.5.4	<i>Mesure à intervalles réguliers des paramètres de base</i>	117
5.5.5	<i>Détails de mesure de l'évolution de la distance</i>	118
5.5.6	<i>Détails de mesure de l'évolution de l'orientation</i>	119
5.5.7	<i>Détails de la fonction d'évaluation des signes d'appréciation</i>	120
5.5.8	<i>Détails de la fonction d'évaluation des tentatives d'imitation</i>	120
5.5.9	<i>Détails de la fonction de calcul de l'interaction sociale</i>	121
5.6	CONCLUSION DU CHAPITRE 4.....	121
6	CHAPITRE 5 – RÉSULTATS ET DISCUSSION	123
6.1	INTRODUCTION.....	123
6.2	RÉSULTATS DE LA PHASE EXPÉRIMENTALE 1	123
6.2.1	<i>Série de tests effectuée avec le Participant 1</i>	124
6.2.2	<i>Série de tests effectuée avec la Participante 2</i>	125
6.3	RÉSULTATS DE LA PHASE EXPÉRIMENTALE 2	128
6.3.1	<i>Résultats de la phase de salutations</i>	129
6.3.2	<i>Résultats de la phase de pairing</i>	129
6.3.3	<i>Résultats de la phase d'imitation</i>	129
6.4	ANALYSE DES RÉSULTATS DU SONDAGE PAR QUESTIONNAIRE	132
6.5	RÉSULTATS DE LA PHASE EXPÉRIMENTALE 3	133
6.5.1	<i>Commentaires sur la phase expérimentale 3a</i>	133
6.5.2	<i>Résultats de la phase expérimentale 3b</i>	134
6.6	DISCUSSION	151
6.7	CONCLUSION DU CHAPITRE 5.....	153
7	CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES	156
8	RÉFÉRENCES	160
9	ANNEXES	170
9.1	ANNEXE 1 - QUESTIONNAIRE VIERGE	170
9.2	ANNEXE 2 - CANEVAS DE SESSION EXPÉRIMENTALE	173
9.3	ANNEXE 3 - PROTOCOLE DE CONSENTEMENT.....	176
9.4	ANNEXE 4 – CODE DE BASE DU JEU D'IMITATION	177
9.5	ANNEXE 5 – EXEMPLES DE QUESTIONNAIRES COMPLÉTÉS	181
9.5.1	<i>Questionnaire de la Fondatrice Directrice du CAMPSE (Abidjan)</i>	181
9.5.2	<i>Questionnaire d'un Psychologue clinicien spécialisé en troubles neurodéveloppementaux</i>	183
9.5.3	<i>Questionnaire d'une Maman d'adolescent autiste</i>	185
9.6	ANNEXE 6 – RETOUR DE LA MÈRE DU PARTICIPANT K	187
9.7	ANNEXE 7 – AUTRES PHOTOS DES SÉANCES.....	189
9.8	ANNEXE 8 - PREMIER COLLOQUE IVOIRIEN SUR L'AUTISME	190

LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Schématisation IA, ML, DL	21
Figure 2 - La dyade autistique	26
Figure 3 - Illustration des stades du soi de Daniel Stern [Stern, 1995]	33
Figure 4 - Évolution des variables mesurées lors de l'expérimentation de Nadel	36
Figure 5 - La reconnaissance d'être imité(e)	40
Figure 6 - Types de modèles de représentation de gestes.....	41
Figure 7 - Processus de reconnaissance de poses (par vision)	42
Figure 8 – Étapes avant l'automatisation	42
Figure 9 - Représentation de l'espace de poses humaines avec trois gaussiennes et les espaces tangents correspondants.....	44
Figure 10 - Andy enseigne des compétences sociales à un enfant autiste (dw.com)	47
Figure 11 - Peeke (I) robot	52
Figure 12 - Plusieurs générations du robot Aibo	52
Figure 13 - Illustration des séances avec un robot physique et un robot virtuel	54
Figure 14 - Le robot humanoïde KASPAR	57
Figure 15 - Capture d'écran montrant la reconnaissance de poses.....	71
Figure 16 - Configuration de l'espace d'expérimentation (phase 3)	75
Figure 17 - Diagramme de flux du jeu d'imitation.....	80
Figure 18 - Éléments visibles de SIRIA (phase expérimentale 3).....	100
Figure 19 - Arborescence fichiers ROS.....	109
Figure 20 - Représentation des articulations du squelette détecté.....	110
Figure 21 - Capture de l'import de la librairie Skeletons	112
Figure 22 - Capture de l'import de la librairie Gestures.....	114
Figure 23 - Capture de la fonction de reconnaissance de gestes	115
Figure 24 - Capture de la procédure principale du code du jeu.....	116
Figure 25 - Capture du lancement du programme du jeu	117
Figure 26 - Schéma des sections d'orientation	119
Figure 27 - Résultats expérimentaux de l'implémentation de l'algorithme Openpose avec le Participant 1	125
Figure 28 - Résultats expérimentaux positifs de l'implémentation de l'algorithme Openpose avec la Participante 2	126
Figure 29- Échecs de détection complète de squelette	127
Figure 30 - La figure se détourne du robot.....	136
Figure 31 - La participante fait face au robot mais reste à distance	137
Figure 32 - La participante regarde le robot et bat des mains	138
Figure 33 - La participante est proche de et observe le robot (2206-1).....	139
Figure 34 - La participante touche spontanément la main du robot (2206-1)	140
Figure 35 - La participante manifeste des signes de joie (2206-2).....	141
Figure 36 - La participante affiche sa joie en battant des mains (2306).....	142
Figure 37 - La participante se détourne et s'éloigne (SC10)	143
Figure 38 - Graphe de l'évolution globale de distance	146
Figure 39 - Graphe de l'évolution globale de l'orientation	146
Figure 40 - Participant K with QTrobot	150
Figure 41 – QTrobot with participant J and the human help	189
Figure 42 - QTrobot with Participants J and K and the human help	189
Figure 43 - Support de communication du 1er colloque ivoirien sur l'autisme.....	190

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 - sous-échelle d'évaluation de l'imitation.....	35
Tableau 2 - sous-échelle d'évaluation de la reconnaissance d'être imité(e)	35
Tableau 3 - Niveaux de performance motrice provoquée	55
Tableau 4 - Caractéristiques des participants (phase 2)	72
Tableau 5 - Caractéristiques des participants (phase 3)	74
Tableau 6 - Tableau comparatif de robots sociaux.....	87
Tableau 7 - Échelle de Likert pour l'évolution de distance	94
Tableau 8 - Échelle de Likert pour l'évolution d'orientation du corps	95
Tableau 9 - Échelle de Likert pour l'évolution d'orientation de la tête.....	95
Tableau 10 - Résultats de détection de segments de squelettes.....	128
Tableau 11 - Scores obtenus aux phases du jeu.....	129
Tableau 12 - Résultats qualitatifs pour la phase 2	130
Tableau 13 - Résultats de l'approche initiale vers le robot (Phase 3).....	144
Tableau 14 - Présence d'un moment "intime" avec le robot.....	144
Tableau 15 - Orientation dominante du corps	144
Tableau 16 - Évaluation de la présence d'une réaction positive au robot	144
Tableau 17 - Nombre de contacts physiques avec le robot	145
Tableau 18 - Évaluation de la présence de signes de joie	145
Tableau 19 - Calculs des niveaux d'interaction sociale	148

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

2D	En deux dimensions
3D	En trois dimensions
ABA	Applied Behavior Analysis
ADI-R	Autism Diagnostic Interview, Revised
ADOS	Autism Disorder Observation Schedule
ASD	Autism Spectrum Disorder
ASF	Autistes Sans Frontières
CAMPSE	Centre d'Aide Médico-Psycho Social de l'Enfant
CARS	Childhood Autism Rating Scale
CRA	Centre de Ressources Autisme
DI	Déficit Intellectuel
DL	Deep Learning – apprentissage automatique profonde
DSM	Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders
DREAM	Development of Robot-Enhanced therapy for children with Autism spectrum disorders
EDP	École Doctorale Polytechnique
GMM	Gaussian Mixture Model
HMM	Hidden Markov Model
IA	Intelligence Artificielle
IMTA	Institut Mines Télécom Atlantique
INPHB	Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny
IS	Interaction Sociale
IHM	Interaction Homme-Machine
IHR	Interaction Homme-Robot
MathSTIC	Mathématiques, Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication
MIT	Massachusetts Institute of Technology (Boston)
ML	Machine Learning – apprentissage automatique
PEP	Psycho-Educative Profile
RET	Robot-Enhanced Therapy
SHT	Standard Human Treatment
TSA	Troubles du spectre de l'autisme

SYMBOLES ET NOTATIONS MATHÉMATIQUES

\mathbb{R}^3	Espace euclidien en trois dimensions
S^3	Espace riemannien
\mathcal{H}	Espace de poses humaines
x	Point de l'espace des poses humaines
P_N	Position relative normalisée de la N-ième articulation
p_n	Position absolue de la N-ième articulation
p_{ss}	Position absolue de la colonne vertébrale
L_{spine}	Longueur de la colonne vertébrale
O_N	Orientation de la N-ième articulation
y_t	Pose humaine à l'instant t
x	Encode la pose humaine y_t et l'horodatage associé
μ	Moyenne
$d(\mu, p)$	Distance géodésique
K	Nombre de gaussiennes
ϕ_k	Poids de la k-ième gaussienne
μ_k	Centre de masse riemannien de la k-ième gaussienne
Σ_k	Matrice de covariance de la k-ième gaussienne

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1 INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 Contexte et problématique

Dans l'article [Vaillant, 1977], l'auteur affirme que l'être humain a besoin de liens sociaux sains et positifs pour être heureux. Cette affirmation s'appuie sur la plus longue étude de l'histoire, lancée à Harvard en 1938 et ayant permis d'observer plusieurs générations de personnes (724 sujets sur une période de 75 ans), dans leur vie sociale quotidienne ainsi que sur le plan psycho-médical.

Deux groupes d'hommes de nationalité états-unienne ont été suivis au cours de cette étude, constituée de deux sous-études menées en parallèle : « Grant Study » et « Glueck Study ».

Dans le cadre de l'étude dite de Grant, le groupe de participants était constitué de 268 étudiants en deuxième année à Harvard (promotions 1942, 1943 et 1944).

Dans le cadre de l'étude dite de Glueck, les 456 participants étaient de jeunes hommes ayant vécu, entre 1940 et 1945, dans l'un des quartiers les plus défavorisés de la ville de Boston.

Tous les deux ans, les sujets étaient évalués au travers de questionnaires, d'entretiens individuels et des avis de leurs médecins. Les chercheurs questionnaient divers aspects de leurs vies : les liens avec les membres de leurs familles respectives, l'état de leurs amitiés, leurs relations de couple, leur degré d'épanouissement au travail, leurs éventuelles activités sociales. Et tous les cinq ans au minimum, leur état de santé mentale et physique était évalué.

Ces hommes ont connu des carrières professionnelles très variées : politiciens, ouvriers, médecins, soldats de l'armée, avocats, ... Certains sont devenus alcooliques, ont contracté des maladies graves, et d'autres ont vécu très longtemps en bonne santé.

L'analyse des données recueillies a montré que ce n'était pas le niveau social ou le degré de célébrité qui impactaient le plus le sentiment de bonheur ressenti par les sujets, mais bien la qualité des relations sociales qu'ils entretenaient avec leur entourage.

La qualité des liens sociaux d'un être humain dépend naturellement de plusieurs facteurs, dont certains sont familiaux, culturels, environnementaux. D'autres encore sont liés à sa personnalité ou son état de santé.

Il existe des troubles neurodéveloppementaux qui se caractérisent justement par une « interaction sociale » déficiente, en plus des difficultés de communication et des comportements atypiques. Il s'agit des troubles du spectre autistique. On parle parfois d'autisme de manière globale, mais il convient de garder à l'esprit qu'il se manifeste sous des formes très variées.

1.2 Objectifs et méthodologie générale

Afin de contribuer à une meilleure intégration à la société et au bonheur des personnes atteintes de troubles du spectre autistique (TSA), on pourrait s'atteler à lutter contre leur isolement en améliorant les interactions sociales avec elles.

La société bénéficierait de ce processus puisque les personnes autistes sont souvent décrites comme dénuées de malveillance et dotées de talents spécifiques.

L'imitation étant reconnue comme un pilier de la communication non verbale, nous concevrons et implémenterons un jeu d'imitation gestuelle, en vue d'améliorer la communication et les interactions sociales avec des autistes.

Nous ferons usage des technologies de l'information et de la communication, ceci au vu du domaine dans lequel s'inscrit cette thèse, mais aussi parce qu'il a été montré qu'elles peuvent permettre d'améliorer les interactions sociales, même avec des enfants autistes [Dautenhahn, 1999]. Il s'agira d'identifier les méthodes et outils les plus adéquats à notre contexte et à notre population cible.

Nous nous appuierons notamment sur des entretiens semi-dirigés avec des accompagnants d'enfants et adolescents autistes, des questionnaires à choix multiples, un scénario de jeu d'imitation à quatre phases, un algorithme d'intelligence artificielle pour la reconnaissance de gestes, un robot social interactif.

L'usage du robot est motivé par plusieurs facteurs démontrés par la littérature. Notamment, la prédictibilité et les expressions faciales simplifiées associées, sont plus faciles à appréhender pour les personnes autistes. De plus, utiliser un robot pour mener le jeu d'imitation, réduit la pénibilité de l'exécution, répétitive et prolongée, de tâches pour les accompagnants, éducateurs spécialisés et parents.

Il est important de mettre en relief le fait que des configurations tripartites, voire temporairement quadripartites, seront recommandées. On veut un robot qui assiste, et non qui remplace l'humain.

Relativement au jeu d'imitation, c'est l'imitation gestuelle qui sera préférée, étant plus accessible par notre population cible, et plus facilement mesurable, que l'imitation faciale par exemple.

Notre population cible étant spécifique, caractérisée par plusieurs critères dont notamment la présence de troubles du spectre autistique, eux-mêmes très divers, cela laisse présager d'un certain niveau de complexité dans les travaux à mener.

La littérature nous amènera à nous focaliser sur les préadolescents et adolescents TSA, avec déficit intellectuel, généralement non verbaux.

Pour pratiquer l'imitation gestuelle dans une configuration tripartite patient-accompagnant-robot, où le robot mènera le jeu et l'accompagnant sera incitateur visuel ou physique, on a besoin d'un algorithme de détection de poses et d'un algorithme de reconnaissance de gestes.

En effet, dans le cas où le patient imite le robot, ce dernier doit pouvoir détecter les poses successives du participant, reconnaître ses gestes, afin d'évaluer la qualité de l'imitation.

Par ailleurs, lorsque c'est le robot qui imite le patient, il doit naturellement être capable de distinguer les gestes consignés.

1.3 Contributions de la thèse

Les présents travaux portent sur les axes de recherche suivants :

- l'usage de l'intelligence artificielle pour effectuer la reconnaissance de gestes d'adolescents autistes en environnement réel, dans le cadre d'un jeu d'imitation
- l'étude de l'impact de la pratique ludique de l'imitation sur la production d'interactions sociales
- l'évaluation du niveau des interactions sociales avec des adolescents autistes avec déficit intellectuel.

Les contributions spécifiques que nous faisons sont :

- un scénario original de jeu d'imitation, en quatre phases, élaboré en collaboration avec des accompagnants d'enfants et adolescents autistes
- un algorithme informatique capable de mener le jeu d'imitation et de mesurer certains paramètres utiles
- une proposition de méthode de mesure du niveau d'interactions sociales sur la base d'indicateurs obtenus via notre système
- la conceptualisation et l'implémentation d'un système global appelé SIRIA, pour système social, informatique et robotique visant à susciter des interactions sociales avec des autistes.

1.4 Organisation du manuscrit

Le présent document est constitué d'une introduction générale, de quatre chapitres avec leurs conclusions, ainsi que d'une conclusion générale.

Dans un premier chapitre, nous exposerons la littérature relative à notre sujet. Cet état de l'art porte précisément sur la pratique de l'imitation avec des enfants autistes, sur l'apprentissage par imitation ainsi que sur l'usage des technologies de l'information et de la communication (TIC), dans le cadre de la prise en charge des personnes autistes.

Le second chapitre présentera notre problématique, nos hypothèses de recherche ainsi que la démarche méthodologique adoptée.

C'est dans le troisième chapitre que se fera la présentation détaillée du système proposé, en vue de permettre la pratique ludique de l'imitation gestuelle avec des adolescents autistes avec déficit intellectuel.

Les expérimentations effectuées seront décrites, les résultats consolidés et discutés, dans le quatrième chapitre.

Puis nous conclurons ces travaux en proposant quelques perspectives concrètes.

CHAPITRE 1 : GÉNÉRALITÉS

2 CHAPITRE 1 – GÉNÉRALITÉS

2.1 Introduction

Le thème principal de nos travaux de recherche est le suivant : « Production d'interactions sociales avec des adolescents autistes, via un jeu d'imitation gestuelle impliquant un robot assistant ».

Dans ce chapitre, nous définirons les termes clés de notre thème, notamment l'intelligence artificielle, le « machine learning », le « deep learning », l'imitation, l'autisme, l'interaction sociale, l'interaction humain-robot (IHR).

Il s'agira de fournir aux lecteurs, ainsi qu'aux lectrices, la maîtrise du vocabulaire varié et spécialisé, dont nous ferons usage au fil des pages du présent manuscrit de thèse de doctorat.

2.2 L'intelligence artificielle et la reconnaissance de poses ou gestes

L'intelligence artificielle (IA) est un processus d'imitation de l'intelligence humaine qui repose sur la création et l'application d'algorithmes exécutés dans un environnement informatique dynamique. Son but est de permettre à des ordinateurs de penser et d'agir comme des êtres humains.

Il existe trois types d'IA : l'intelligence artificielle étroite (ANI), l'intelligence artificielle générale (AGI) et la super intelligence artificielle (ASI). Nous ne détaillerons pas ici ces trois types mais nous nous situerons dans l'AGI.

Voyons à présent plus en détails deux groupes d'algorithmes d'intelligence artificielle, parmi les plus usités : les systèmes experts et les réseaux de neurones.

Un système expert est un outil d'intelligence artificielle, capable de simuler le savoir-faire d'un expert humain dans un domaine précis, en exploitant des bases de données spécifiques audit domaine, et en recourant à un moteur d'inférence pour simuler différents raisonnements déductifs.

Un réseau de neurones artificiels permet aux machines de copier le fonctionnement du cerveau humain. Avec la technologie de l'intelligence artificielle, le réseau de neurones se perfectionne progressivement, jusqu'à devenir autonome par la technique du deep learning. Explorons de quoi il s'agit.

En IA, on parle souvent de Machine Learning et de Deep Learning. Voyons ici l'historique puis le lien entre les deux appellations.

Le concept de Machine Learning date du milieu du 20ème siècle. Dans les années 1950, le mathématicien britannique Alan Turing imagine une machine capable d'apprendre, appelée en anglais, une « Learning Machine ».

Le Machine Learning ou apprentissage automatique est un domaine scientifique, et plus particulièrement une sous-catégorie de l'intelligence artificielle. Celle-ci consiste à laisser des algorithmes découvrir des motifs récurrents, appelés « patterns » en anglais, au sein d'ensembles de données. Ces données peuvent être de nature variable, par exemple des chiffres, des mots, des images, des statistiques... Tout ce qui peut être stocké numériquement peut servir de données pour le Machine Learning. En décelant les informations récurrentes dans ces données, les algorithmes apprennent et améliorent leurs performances dans l'exécution d'une tâche spécifique.

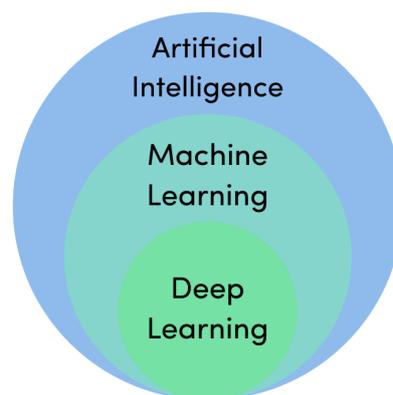


Figure 1 - Schématisation IA, ML, DL

Le *deep learning* ou apprentissage profond est un type d'intelligence artificielle dérivé du *machine learning* (apprentissage automatique) où la machine est capable d'apprendre par elle-même, contrairement à la programmation où elle se contente d'exécuter à la lettre des règles prédéterminées. L'apprentissage profond s'appuie sur un réseau de neurones artificiels, qui s'inspire naturellement du cerveau de l'être humain. Ce réseau est composé de dizaines voire de centaines de « couches » de neurones, chacune d'entre elles recevant et interprétant les informations de la couche précédente. Le système apprendra par exemple à déceler s'il y a une voiture sur une photo donnée, avant de découvrir de quelle marque et de quel modèle il est question. À chaque étape, on élimine les « mauvaises » réponses et on les renvoie vers les niveaux en amont, en vue d'ajuster le modèle mathématique. Au fur et à mesure, le programme

réorganise les informations en blocs de plus en plus complexes. Lorsque ce modèle est par la suite appliqué à d'autres cas, il est en principe capable d'effectuer la reconnaissance d'un objet, sans qu'on lui en ait appris le concept. Les données de départ sont essentielles : plus le système accumule d'expériences différentes, c'est-à-dire plus la taille du jeu de données est importante, plus il sera performant.

Aujourd'hui, il est dit que les intelligences artificielles fortes n'existent pas. L'IA progresse pour se rapprocher de l'intelligence humaine mais n'y parvient pas.

En informatique, l'apprentissage par imitation est un domaine dans lequel plusieurs barrières se dressent encore. On l'appelle également la programmation par démonstration. Comme l'apprentissage par renforcement, inspiré de la théorie pavlovienne de conditionnement, c'est une forme d'apprentissage automatique. L'apprentissage automatique se définit comme une branche de l'intelligence artificielle (IA) et de l'informatique qui utilise principalement des données et des algorithmes pour imiter la manière dont le cerveau humain apprend. C'est par généralisation, sur la base de l'observation de nombreuses démonstrations d'une action, que l'ordinateur ou le robot apprendra à la réaliser. Ce processus est naturel chez l'être humain, comme décrit dans [Tenenbaum, 2006].

En IA, la première phase de la programmation par démonstration, dite phase d'entraînement ou simplement d'apprentissage, consiste en l'estimation du modèle qui sera utilisé. Il s'agit d'effectuer plusieurs fois la tâche cible pour entraîner le système à la reproduire. Cette tâche peut consister en la reconnaissance d'un élément particulier sur une image, au déchiffrement des émotions faciales ou des mouvements des lèvres, à la traduction d'un texte, à la reconnaissance d'un geste, ou à une quelconque autre action effectuée naturellement par le cerveau humain.

Une fois le modèle appris, le système peut entrer dans la phase de production au cours de laquelle il le mettra en pratique, en tentant d'exécuter la tâche par lui-même.

Par exemple, si la tâche est de reconnaître une pose humaine donnée, plusieurs photos de personnes affichant cette posture, pourront être collectées et stockées dans un répertoire portant le nom ou le numéro de la pose. Dans ce cas de figure où les données sont étiquetées, on qualifie l'apprentissage de supervisé. Et puisque les données ne sont pas continues, mais discrètes, il s'agira d'un travail de classification. Une fois l'entraînement effectué, le système sera capable, à partir de nouvelles photos en entrée, de déterminer si la personne se trouve ou non dans la pose pré-apprise.

Lorsque les étiquettes sont continues, on parlera de régression plutôt que de classification.

Dans le cas de données non étiquetées, c'est-à-dire pour lesquelles la réponse à la tâche cible n'est pas connue d'avance, on parlera d'apprentissage non supervisé.

Pour la reconnaissance gestuelle, plusieurs algorithmes de classification peuvent être utilisés :

- En ML :

- Hidden Markov Models (HMM)
- Artificial Neural Networks (ANN)
- K-nearest neighbor (KNN)
- Naive Bayes (NB)
- Support Vector Machine (SVM)
- Decision Tree (DT)
- Random Forest (RF)
- Linear Discriminant Analysis (LDA)

- En DL :

- Recurrent Neural Network (RNN)
- Convolutional Neural Network (CNN)

De nombreux outils logiciels sont disponibles, parmi lesquels les bibliothèques « GestureRecognition Toolkit » (MIT, 2014), OpenCV, Social Signal Interpretation (SSI), Tensorflow.

Les domaines d'application de la reconnaissance de gestes sont très variés : des langues des signes au contrôle alternatif de systèmes, en passant par les jeux vidéo immersifs et bien d'autres.

2.3 L'interaction sociale

L'interaction sociale se définit parfois comme un ensemble d'influences résultant de l'activité, ou de la simple coexistence, de plusieurs éléments d'un groupe, social ou non.

Cette définition se prête à la controverse car dans plusieurs cas de figure, il peut y avoir coexistence de plusieurs éléments d'un groupe et pourtant, aucune interaction sociale. À titre d'exemple, la présence simultanée d'une personne sans domicile fixe, d'un directeur

d'entreprise et d'un adolescent parcourant les réseaux sociaux sur son téléphone « intelligent », au sein d'une même rame de métro en Europe, parfois assis dans un même carré de sièges.

Dans le domaine spécifique des sciences sociales, l'interaction sociale fait référence à tout processus qui implique une stimulation réciproque entre au moins deux individus.

Nous retiendrons cette définition. Elle est large et couvre des situations variées, telles une première rencontre entre deux personnes, un échange commercial au niveau de la caisse d'une boutique d'artisan, ou une discussion de groupe.

Une interaction sociale ne sous-entend pas un échange de mots.

Imaginez que lors d'un de vos trajets en bus ou train, vous remarquiez qu'une personne vous observe du coin de l'œil et reproduise vos gestes : un doigt passé sur le sourcil, un ajustement de lunettes ou de coiffure. Cela pourrait, après vous avoir interpellé(e), finir par soit vous amuser, ou vous agacer. Sans une parole et même à distance, une forme d'interaction sociale aurait eu lieu.

Nous verrons un peu plus loin en quoi consiste le processus complexe de l'imitation et pourquoi il est utile pour susciter des interactions sociales.

Mais d'abord, intéressons-nous plus avant, d'une part, à ce qu'est l'autisme, et d'autre, à l'interaction homme-robot.

2.4 L'autisme

En 1943, le pédopsychiatre Léo Kanner (1894-1981) définissait le tableau clinique de l'autisme infantile précoce. Il caractérisait l'autisme par ces trois critères : troubles des interactions sociales, troubles de la communication verbale, gestes répétitifs et stéréotypés. C'est en observant onze enfants, de 1938 à 1943, qu'il avait fini par comprendre que les différents troubles du comportement et de l'intelligence que ceux-ci présentaient, étaient en fait des symptômes variés d'un même désordre au niveau neurologique. Le terme « autisme » avait initialement été créé par Eugene Bleuler, psychologue suisse, pour faire référence à l'une des manifestations de second niveau, présentes chez les jeunes adultes schizophrènes. Kanner le réutilisa, en le dissociant du diagnostic de schizophrénie, pour faire référence à une condition neuro-développementale caractérisée par la présence des différents troubles susmentionnés.

En 1944, Hans ASPERGER (1906-1980), pédiatre autrichien, rédigeait un article traitant d'enfants atteints de troubles de la communication non-verbale et de déficiences sociales, en définissant le concept de « psychopathie autistique ». Ses travaux ayant été menés en allemand

au cours de la seconde guerre mondiale, restèrent quasi-inconnus des cercles de recherche anglophone et francophone jusque dans les années 70. C'est à partir de cette période que s'est intensifiée la recherche sur l'autisme.

Selon la classification internationale des maladies de l'OMS (CIM 10), l'autisme est un trouble envahissant du développement qui affecte les fonctions cérébrales. Il n'est de nos jours plus considéré comme une affection psychologique ni comme une maladie psychiatrique.

Au vu de leur variété, il conviendrait de parler de troubles du spectre de l'autisme comme des troubles neurologiques qui affectent principalement les relations sociales et la communication. Ils se manifestent aussi par des comportements atypiques et le développement d'intérêts restreints chez la personne atteinte.

Les comportements dits atypiques ou stéréotypés sont divers : certains mouvements répétitifs des mains, une tendance à positionner sa main à quelques centimètres du visage et à la fixer du regard, ou encore l'habitude de griffer l'autre ou se cogner la tête sur un mur en cas de frustration profonde. Certains comportements pouvant être gênants voire dangereux pour la personne autiste ou son entourage, il est nécessaire d'identifier des moyens pour les atténuer.

Chaque trouble du spectre de l'autisme présente des spécificités. Initialement, on distinguait quatre types.

Le syndrome d'Asperger, très similaire à l'autisme à haut niveau de fonctionnement, n'implique pas de déficit intellectuel. La différence clé est qu'une personne Asperger acquiert généralement le langage de manière très précoce.

L'autisme de Kanner, encore appelé autisme infantile, est une forme sévère et dont les premiers symptômes sont visibles avant la troisième année de vie.

Le syndrome de Rett, caractérisé par un développement initial typique suivi d'un arrêt voire d'une perte de capacités, notamment aux niveaux langagier et psychomoteur. Cette régression dans les capacités acquises est encore plus précoce et prononcée dans le cas du trouble désintégratif de l'enfance, où l'enfant perd tout intérêt pour son environnement social, contrairement aux enfants atteints du syndrome de Rett qui, malgré le retard mental sévère occasionné, conservent un intérêt pour la socialisation.

À partir de la DSM-V, cinquième version du manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux, publié en 2013 par l'Association Psychiatrique Américaine (APA), on parle de dyade plutôt que de triade autistique. En effet, les déficits en termes d'interactions sociales et de communication, sont regroupés en une même catégorie :

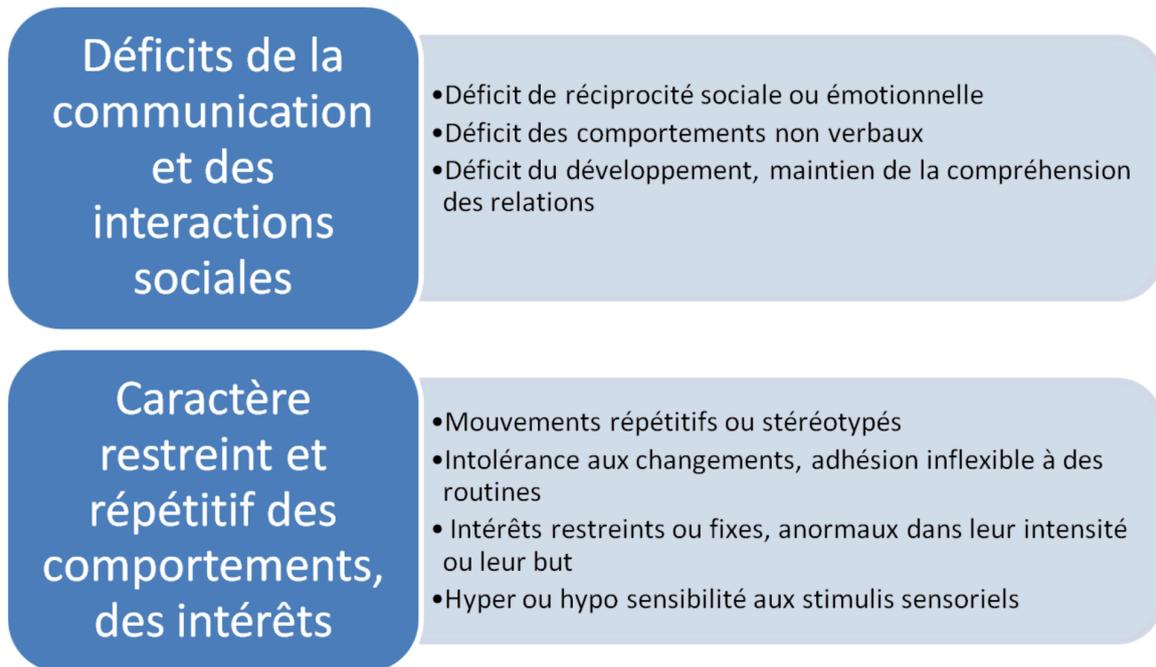


Figure 2 - La dyade autistique

Les personnes autistes, loin de ne présenter que des déficits, ont également des talents particuliers, comme une mémoire excellente, un niveau exceptionnel d'attention au détail, de minutie, ou encore une capacité hors du commun à respecter des routines et emplois du temps avec des horaires extrêmement précis.

Selon [Elsabbagh, 2012] la prévalence globale des troubles envahissants du développement (autisme, syndromes d'Asperger et de Rett, trouble désintégratif de l'enfance et autres non spécifiés) serait d'un pour 160. Les chiffres de prévalence ont augmenté au fil du temps. Un facteur plausible serait le développement de la tendance à recourir à un diagnostic formel. Cependant, même s'il n'a pas été prouvé que le nombre de personnes autistes s'est effectivement accru, cette option ne devrait pas être exclue.

On note que l'occurrence des troubles du spectre autistique est plus fréquente chez les individus de sexe masculin que de sexe féminin.

Certaines études de prévalence ont été effectuées par zone géographique [Chiarotti, 2020] et laissent supposer l'importance de certains facteurs environnementaux. Ceux-ci viennent compléter les facteurs génétiques avérés, telle la présence de la maladie X-fragile ou d'autres anomalies génétiques.

Cependant, à ce jour, les causes précises d'apparition des troubles du spectre autistique ne sont pas maîtrisées [Ratajczak, 2011].

De nombreux travaux de recherche scientifique ont porté sur des enfants autistes, soit en vue de la démonstration ou de l'amélioration de certaines de leurs capacités, ou encore de l'atténuation de certains comportements gênants.

Certaines études ont fait usage d'outils ou technologies numériques, d'autres se sont appuyées sur des méthodes plus traditionnelles.

Parmi celles ayant tiré parti du numérique, on peut distinguer plusieurs catégories. Certaines études se focalisent sur l'utilisation de tablettes éducatives afin d'améliorer les capacités d'apprentissage des personnes autistes. D'autres intègrent un agent virtuel intelligent dans le quotidien de l'enfant autiste en vue de développer sa capacité d'interaction sociale et de faciliter l'acquisition de certaines compétences. Quelques travaux s'appuient sur la robotique sociale dans le but d'atteindre ces mêmes objectifs.

2.5 L'interaction homme-robot

Le domaine de l'interaction homme-robot est à l'interface de plusieurs autres, parmi lesquels l'interaction homme-machine, la robotique, l'intelligence artificielle, la conception industrielle, la psychologie sociale.

Ce domaine de recherche extrêmement riche, pluridisciplinaire, a déjà contribué à transformer divers secteurs d'activités et plusieurs aspects de la vie quotidienne.

L'industrie, l'éducation et la médecine sont trois des secteurs les plus impactés dans le monde, mais de manière très inégale selon les zones géographiques, le niveau de développement économique des pays. D'autres domaines se laissent peu à peu transformer, tels ceux de la culture, du tourisme, de l'agriculture.

Dans le domaine industriel, les êtres humains s'appuient sur des robots afin de mener à bien les activités de production et d'assemblage. Les robots peuvent manipuler des objets lourds, dangereux, de façon répétitive, réduisant le degré de pénibilité du travail pour l'être humain. Celui-ci peut alors se concentrer sur l'usage de son expérience et de son intelligence afin d'analyser différentes approches, prendre des décisions puis actionner le robot pour accomplir les tâches voulues.

Dans le domaine médical, l'être humain peut utiliser un robot pour exécuter des tâches répétitives comme dans le cadre de séances de réhabilitation physique, ou des tâches nécessitant une extrême précision, comme en chirurgie. Certaines opérations sont aujourd'hui effectuées par un médecin, à l'aide d'un robot assistant, appuyés par le reste de l'équipe composée d'infirmier(s), anesthésiste, ...

Certains robots contribuent à l'accompagnement des personnes du troisième âge, de personnes ayant subi un accident vasculaire cérébral [Matarić, 2007] ou encore à la prise en charge de personnes présentant des troubles du développement, telles les personnes autistes [Scassellati, 2012]. Lors de la pandémie à coronavirus qui a débuté en 2019, l'intérêt des robots sociaux a été mis en exergue [Scassellati, 2020].

Dans ce cadre d'interventions robotiques pour des personnes autistes, le robot doit être capable d'interagir socialement, au travers de gestes communicatifs, de paroles et d'expressions faciales.

Au travers des quelques exemples cités, on perçoit que l'interaction homme-robot pourrait être scindée en deux catégories : physique d'une part, socio-émotionnelle d'autre part.

De nombreux défis sont encore à relever dans le domaine de l'interaction homme-robot [Dautenhahn, 2007a], notamment ceux liés à la sécurité, à la performance, ou encore à l'adaptabilité du système robotique au sujet.

Par exemple, il y a encore du travail à mener afin de permettre aux robots sociaux d'effectuer des mouvements vraiment fluides.

De plus, la capacité actuelle des robots à afficher des expressions faciales élaborées correspondant à différents types d'émotions, est très limitée.

De même la communication verbale des robots, à l'aide de techniques de traitement automatique du langage, doit être améliorée pour les rendre plus efficace dans les interactions sociales.

Aussi, dans le cas de robots sociaux, destinés à accompagner des personnes dans leur quotidien, il est particulièrement important d'atteindre un bon niveau d'adaptabilité au sujet, c'est-à-dire d'améliorer leur capacité à réagir en fonction des actions/paroles/expressions du participant, afin que l'interaction soit la plus naturelle et riche possible. Des scénarii et contenus variés devraient être disponibles. Le robot devrait être en mesure de réagir à tous les stimuli de l'agent social avec lequel il communique.

Différents types de robots sont utilisés aujourd'hui pour une vocation sociale. Certains sont humanoïdes, d'autres ont l'apparence d'un animal ou encore d'un personnage abstrait. Dans le cadre de la prise en charge des enfants autistes, plusieurs études [Robins, 2014] [Pinto da Costa, 2018] ont fait usage de petits robots humanoïdes et ont pu montrer une amélioration du niveau d'engagement de l'enfant dans les activités, de la communication ou des interactions sociales.

2.6 L'imitation

[Winnykamen, 1990] indique que le terme d'imitation désigne la correspondance entre le comportement de deux individus, lorsque cette correspondance résulte de la possibilité qu'a eu l'un des deux (celui qui imite) d'observer le comportement de l'autre (le modèle).

L'imitation est un levier important de développement et s'avère être un processus complexe. Dès les premiers mois de sa vie ex utero, c'est par observation de son entourage et imitation que le nourrisson développe ses capacités. Il existe un « réflexe d'imitation », mis en œuvre par exemple lorsqu'un bébé tire la langue à une personne lui tirant la langue.

Tout au long de son parcours sur la Terre, l'être humain apprend à effectuer une myriade de tâches par imitation.

Les tentatives d'imitation peuvent viser une reproduction à l'identique, comme dans le cadre de la copie d'un texte pendant la phase d'apprentissage de l'écriture, ou dans le contexte du plagiat d'œuvres d'art.

Mais il peut aussi simplement s'agir d'imiter le style d'un écrivain, l'objectif n'étant alors pas de réutiliser des phrases extraites de ses livres, mais de parvenir à reproduire un certain « esprit d'écriture » de manière qu'en nous lisant, on ait l'impression de lire un texte de l'écrivain en question.

Par ailleurs, des études ont mis en avant la force de l'imitation comme moyen de communication pragmatique en plus d'être un moyen d'apprentissage. Cela est décrit notamment dans [Nadel, 2021].

[Pfister, 2013] rappelle que l'imitation est cruciale dans certaines fonctions de l'interaction sociale. Du point de vue de la personne qui imite, elle permettrait le développement de l'empathie et de l'apprentissage. Du point de vue de la personne modèle, il est intéressant de constater que le processus d'imitation permet, au travers de la *reconnaissance d'être imité(e)*, de faciliter la production d'actions motrices délibérées. En effet, une personne qui soupçonne ou reconnaît qu'une autre est en train de limiter, aura tendance à produire des actions motrices volontaires, au moins dans un objectif de confirmation de l'intention d'imitation de l'autre.

Dans le cadre de cette thèse, nous utilisons le processus de l'imitation en vue de susciter des interactions sociales avec des adolescents autistes à bas niveau de fonctionnement (avec déficit intellectuel).

2.7 Conclusion du chapitre 1

Dans ce chapitre, nous avons pris le temps de définir précisément chacun des concepts clés qu'il faut maîtriser afin de saisir l'essence, la pertinence, et comprendre l'importance des présents travaux de recherche scientifique.

Les liens entre ces différents termes seront explicités en détails dans les chapitres subséquents. Nous pouvons maintenant procéder à la découverte de la littérature scientifique afférente à notre thème de recherche.

CHAPITRE 2 :

ÉTAT DE L'ART

3 CHAPITRE 2 - ÉTAT DE L'ART

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons la revue de littérature effectuée. Celle-ci portera d'abord sur l'autisme et l'imitation, puis nous présenterons les processus d'apprentissage par imitation, de programmation par démonstration, en insistant sur la reconnaissance de gestes.

Ensuite, nous aborderons l'utilisation des technologies de l'information et de la communication (TIC) dans le cadre de l'accompagnement des personnes autistes. Nous nous focaliserons sur l'usage de jeux sérieux impliquant des agents virtuels, ainsi que d'interventions avec des robots assistants.

3.2 Autisme, imitation et apprentissage

3.2.1 Autisme et imitation

Dans le chapitre 13 de [Fein, 2011], ainsi que dans [Colombi, 2019], les auteurs Colombi, Vivanti et Rogers affirment que les personnes autistes présentent un déficit de la capacité d'imitation des autres. De plus, du fait des liens entre la fonction d'imitation et plusieurs autres domaines du développement, un déficit précoce de l'imitation pourrait vraisemblablement affecter les capacités cognitives et d'adaptation, ainsi que la communication sociale du sujet.

C'est en fait dès 1972 que les difficultés d'imitation chez les enfants autistes ont commencé à être étudiées par DeMyer et ses collègues. À l'époque, les personnes autistes étaient considérées comme psychotiques. [DeMyer, 1972] présente une étude impliquant dix-enfants au total. Le groupe expérimental, composé de trois filles et neuf garçons « psychotiques » (autistes, schizophrènes), avait un âge moyen d'environ 5 ans et 7 mois. Le groupe de contrôle, composé de cinq garçons non psychotiques mais avec un retard de développement, avait un âge moyen de six ans. Les performances des deux groupes ont été comparées pour les trois types de tâches suivants : imitation motrice avec objet, imitation corporelle, usage spontané d'un objet. Le groupe de contrôle s'est avéré meilleur pour l'ensemble des tâches d'imitation. De plus, il a été montré que les difficultés à imiter, combinées à des troubles sévères du langage, empêchaient la communication non-verbale autant que verbale.

Pendant les 20 années suivant ces travaux de DeMyer et collègues, peu d'études se sont penchées sur la question, selon [Rogers, 1991]. Rogers et Pennington ont entrepris de les analyser et leurs travaux ont appuyé l'hypothèse du déficit des capacités imitatives des

personnes autistes. Ils ont également proposé un modèle de développement de l'autisme, s'appuyant sur la théorie du développement interpersonnel décrite dans [Stern, 1995]. Psychiatre états-unien spécialisé dans le développement du petit enfant ainsi que les relations avec sa mère, Daniel Stern a suggéré, dès les années 1980, que l'enfant se développerait au travers d'étapes ou couches successives, interdépendantes et pouvant se chevaucher. De la naissance jusqu'à ses deux mois, le nourrisson serait au stade du « soi émergent » (*emergent self*). De deux à six mois, il expérimenterait l'individualité essentielle (*core self*). Ce stade serait suivi de celui de « soi subjectif » (*subjectif self*) entre sept et quinze mois, avant d'atteindre le stade de « soi verbal » (*verbal self*).

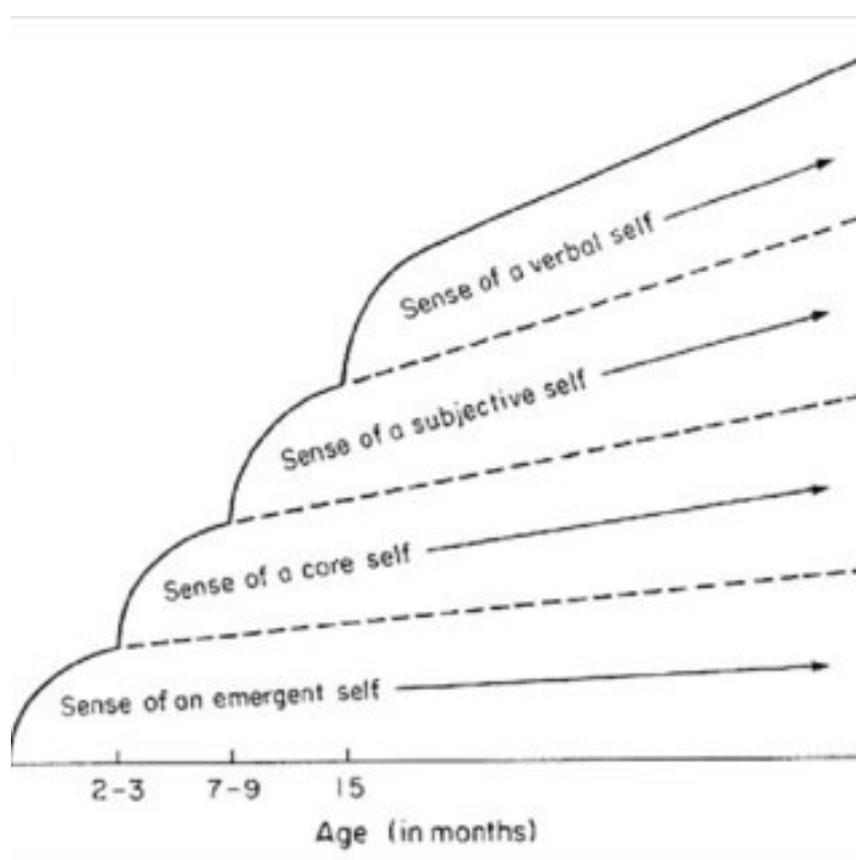


Figure 3 - Illustration des stades du soi de Daniel Stern [Stern, 1995]

Quinze années après ses premiers travaux, Stern les a revisités et republiés en ajoutant deux couches à son modèle : le stade de *core self-with-another* précédant le *subjective self* et le(s) stade(s) de *narrative self/selves* émergeant de celui de « soi verbal ».

Rogers et Pennington ont exprimé le déficit des capacités imitatives auquel sont confrontées les personnes autistes en termes de difficulté à coordonner correctement les représentations de soi

et de l'autre (donc lié au stade du *core self-with-another*). L'hypothèse qu'ils ont alors énoncée est que le déficit d'imitation causerait une suite de conséquences parmi lesquelles des difficultés en termes d'attention conjointe, de langage, de jeu symbolique, d'attribution d'intentions ou de croyances à d'autres personnes (théorie de l'esprit ou « TOM »).

Suite à la publication de leurs travaux, l'intérêt pour le sujet s'est accru et de nombreuses expérimentations ont pu confirmer, au moins partiellement, leur hypothèse.

La théorie de l'esprit est l'aptitude d'une personne à comprendre que les états mentaux des autres (perceptions, croyances, intentions, pensées, points de vue) peuvent être différents des siens. L'accès à la théorie de l'esprit est une compétence nécessaire pour comprendre, expliquer, prévoir et influencer le comportement des autres.

Plusieurs chercheurs s'étaient déjà penchés sur la théorie de l'esprit chez les personnes autistes, et approfondiront leurs études au fil des années [Baron-Cohen, 1985; 1987; 1988; 1989 ; 1991a; 1991b; Baron-Cohen, Leslie et Frith, 1986; Happé, 1994a]. Au travers de tâches représentationnelles de premier niveau (test des Smarties, jeu de Sally et Anne) et de second niveau (par exemple, sur la base de l'histoire de Mary et John), il a été démontré un déficit représentationnel affectant la théorie de l'esprit chez la personne autiste. Cela peut être remarqué dans le cadre de diverses situations. L'autiste expérimente d'importantes difficultés, voire une incapacité, à percevoir les émotions d'une autre personne, à discerner ses intentions, considérer ses connaissances, à anticiper ce qu'autrui pourrait penser de ses propres comportements, ou encore à comprendre des malentendus et à concevoir la tromperie.

Jacqueline Nadel est une psychologue qui a longuement travaillé sur l'importance de l'imitation dans l'apprentissage mais aussi et surtout comme outil de communication non verbale [Nadel, 1986]. Ceci parce que l'imitation utilise trois composantes clés de toute communication : synchronie, tour de parole et partage d'attention. [Nadel, 2005] insiste sur la complexité du processus d'imitation et l'existence d'un continuum des capacités imitatives.

Elle décrit ce processus avec plusieurs composantes : l'imitation induite ou provoquée, l'imitation spontanée, la reconnaissance d'être imité(e).

Nadel affirme que ce processus complexe est fondamental non seulement pour l'apprentissage, la communication, mais également la capacité à interagir socialement.

De plus, elle a contribué à montrer que les enfants présentant des troubles du spectre autistique, seraient capables d'imitation. Elle a proposé une expérience au cours de laquelle quatre enfants

autistes de trois à sept ans, sans déficit intellectuel, ont imité. Lors de la séance, il a été proposé aux enfants, différents exercices d'imitation avec des objets du quotidien.

Afin d'évaluer le niveau d'imitation au cours de ses expériences, Nadel a proposé et utilisé les sous-échelles suivantes :

Score	Description
0	Aucun intérêt manifesté pour l'objet
1	Émergence : intérêt manifesté pour l'objet (regard, mouvements vers l'objet, amorce de mouvement)
2	Imitation partielle (mouvement non imitatif de la partie du corps concernée, imitation impliquant une autre partie du corps, imitation sur un autre objet, tentative non aboutie)
3	Imitation réussie

Tableau 1 - sous-échelle d'évaluation de l'imitation

Score	Description
0	Aucune manifestation
1	Émergence : regarde, se rapproche, sourit
2	Teste l'imitateur
3	Teste l'imitateur avec tour de rôle

Tableau 2 - sous-échelle d'évaluation de la reconnaissance d'être imité(e)

Elle a également observé d'autres indicateurs que le niveau d'imitation. Voici la liste complète des variables considérées par Nadel lors de cette expérience :

- La capacité à imiter
- La capacité à reconnaître que l'on est imité(e)
- La proximité physique à l'expérimentateur
- Le degré d'inactivité

La figure ci-dessous est extraite de ses travaux et illustre comment évoluent les paramètres ci-dessus au cours des trois sessions expérimentales avec des enfants autistes :

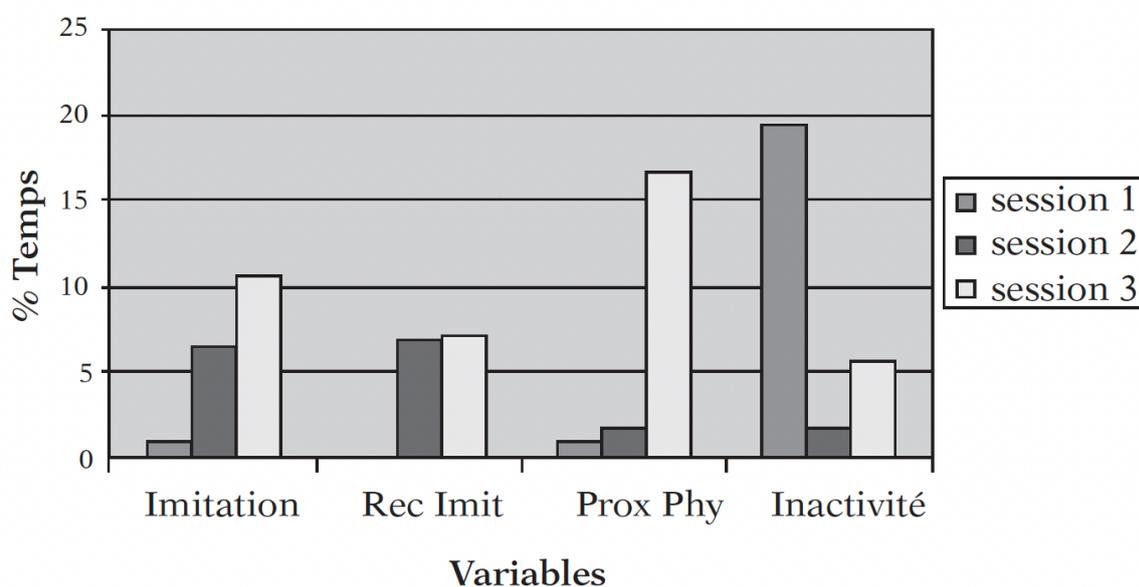


Figure 4 - Évolution des variables mesurées lors de l'expérimentation de Nadel

De la session 1 à la session 3, le temps pendant lequel l'enfant imite passe d'environ 1 à 10% de la durée totale de la session.

Le temps pendant lequel l'enfant reconnaît être imité augmente faiblement de la session 2 à la session 3.

Quant à la période de proximité physique avec l'expérimentateur, elle augmente très légèrement entre les sessions 1 et 2, puis considérablement entre les sessions 2 et 3, d'environ 2 à 16% de la durée totale. Un constat qui interpelle particulièrement est qu'après trois minutes de jeu avec un étranger qui s'approche de l'enfant, ce dernier agit avec lui comme avec un proche, notamment en lui tenant la main et lui faisant des câlins. Or il est positif pour l'enfant autiste de développer un certain niveau de proximité avec l'un de ses accompagnants. Cela suggère l'établissement d'un

lien de confiance, qui permet ensuite à l'accompagnant de mieux capter l'attention de l'enfant, avant de passer à une phase d'apprentissage.

Enfin, lors de cette expérience de Nadel, la durée d'inactivité de l'enfant diminue drastiquement entre les sessions 1 et 2, d'environ 19 à 2% de la durée de session, puis atteint les 5% lors de la session 3. Ceci est également en faveur de la pratique de l'imitation, puisqu'il a été constaté un engagement croissant de l'enfant dans l'activité proposée.

Nadel montre ainsi que globalement, la pratique de l'imitation est bénéfique pour ces enfants présentant des troubles du spectre autistique.

Les travaux de Nadel ont encouragé d'autres chercheurs à explorer plus avant la pratique de l'imitation dans l'objectif d'améliorer les interactions sociales, la communication non verbale, avec les enfants atteints de troubles du spectre autistique.

[Scarpa, 2012] propose une étude pilote visant à améliorer la capacité de communication non verbale d'enfants présentant des troubles du spectre autistique, en faisant usage de l'imitation. Pendant une année scolaire, Scarpa et les autres chercheurs impliqués, dont Nadel, ont travaillé avec huit enfants autistes non verbaux, d'âge biologique compris entre 30 et 84 mois. Ces enfants ont pu bénéficier de 25 séances individuelles d'imitation réciproque, dont le contenu était adapté à chaque enfant. Une constante était cependant l'alternance des rôles d'imitateur et de modèle. Une évaluation des capacités imitatives et de la communication non verbale, a été réalisée avant et après la série de séances. Les résultats ont montré une amélioration de l'imitation au PEP-R et relativement aux trois sous-échelles de Nadel. De plus, une amélioration significative des comportements positifs a été notée lors de l'évaluation finale ainsi que plus tard, dans l'environnement familial.

[Bendiouis, 2015] démontre également des points clés prolongeant le travail de Nadel, en mettant en avant plusieurs effets positifs de la pratique de l'imitation :

- Un entraînement à l'imitation peut effectivement améliorer les capacités imitatives
- Une amélioration des dites capacités facilite la communication non verbale
- L'amélioration de ces conduites imitatives/communicatives réduirait le degré de sévérité du trouble autistique

- Ces différentes évolutions (capacités imitatives, communicatives, sévérité du trouble) dépendraient de caractéristiques cliniques de base (sexe, âge chronologique, âge neurodéveloppemental, degré de sévérité initial du trouble, etc...)

L'auteur travaille avec 21 enfants autistes âgés de 4 à 10 ans.

Dans le cadre des travaux suscités, des échelles standard d'évaluation sont utilisées, notamment l'échelle d'imitation proposée par Nadel, afin d'évaluer le niveau des différentes composantes du processus de l'imitation.

Un point à relever est que les personnes autistes auraient moins de difficultés à imiter des actions nécessitant des objets, et ayant des objectifs bien clairs, qu'à imiter des expressions faciales ou des gestes ne faisant pas usages d'objets physiques. À titre d'exemple, une personne autiste imiterait plus facilement l'action de se coiffer, avec une brosse à cheveux dans la main, que celle de simplement lever les deux bras latéralement, les mains vides et sans but explicite.

Les questions qui ont découlé de ces constats sont nombreuses et concernent les mécanismes sous-jacents à l'imitation. Les difficultés des personnes autistes à imiter seraient-elles dues à une incapacité de percevoir l'intention de l'autre, à une absence de motivation, à un manque d'attention portée aux gestes consignes, à une incompréhension des actions observées, à une incapacité à faire correspondre les actions perçues avec leur schéma corporel ? À d'autres facteurs ?

Ces interrogations sont encore l'objet d'études dans le domaine de la neuropsychologie.

Les études décrites ci-dessus sont intéressantes sur le plan du neurodéveloppement car elles ont démontré comment la pratique de l'imitation pouvait impacter positivement certaines compétences sociales des enfants autistes. Cependant, elles ne se focalisent que sur des enfants, et [Mazon, 2018] révélera le manque criard d'études portant sur des adolescents autistes. Nos travaux seront menés avec une population cible constituée d'adolescents présentant des troubles du spectre de l'autisme. [Vallée, 2020c] propose une étude pilote avec quatre adolescents présentant des troubles du spectre autistique et un déficit intellectuel. Il s'agissait d'implémenter le jeu d'imitation réciproque décrit dans [Vallée, 2020b] avec cette population cible, avec un accompagnant humain et sans robot assistant, afin de susciter des tentatives d'imitation, des interactions sociales. Les résultats encourageants mèneront ensuite à l'implémentation du jeu avec un robot assistant et un incitateur visuel ou/et physique.

De plus, les études de Nadel, Scarpa ou Bendiouis ne font pas usage des outils technologiques qui se sont révélés utiles, par exemple dans le cadre des travaux de [Scassellatti, 2012], [Bernardini, 2014] ou [Belpaeme, 2018]. Les expérimentations de Nadel, Scarpa et Bendiouis consistaient en l'exécution manuelle de jeux d'imitation par les accompagnants humains des enfants autistes. Or, certains outils technologiques peuvent d'une part, améliorer les performances d'imitation des participants, et d'autre part, réduire la pénibilité potentielle du travail des éducateurs et parents, dans le cadre de la pratique régulière et à long terme de l'imitation avec des enfants autistes.

Dans la section suivante, nous étudierons les processus d'apprentissage par imitation, d'apprentissage automatique et de reconnaissance de gestes, car ils seront utiles en vue de l'implémentation, par un système socio-technique, d'un jeu automatisé d'imitation réciproque avec des adolescents autistes.

3.2.2 Apprentissage par imitation et reconnaissance de gestes

L'apprentissage par imitation est le modèle le plus ancien et naturel d'apprentissage [Nadel, 2021].

C'est ainsi que les enfants apprennent les gestes les plus basiques, par imitation de leurs parents, des personnes qui s'occupent d'eux, ou simplement qui les environnent.

C'est par imitation que les tendances de mode se diffusent, et qu'à long terme, les traditions et les cultures se forment.

Dans le contexte de notre jeu d'imitation avec des adolescents autistes, ces derniers seront encouragés à imiter certains gestes, mais il serait également intéressant que le système soit en mesure d'imiter les participants. En effet, la reconnaissance d'être imité(e) joue un rôle important dans le développement de la personne, comme décrit ci-dessous [Nadel, 2002] et dans [Favrot-Meunier, 2019].

RECONNAISSANCE D'ÊTRE IMITÉ

- 1) *À la naissance, le nouveau-né peut regarder le mouvement imité, sans qu'on puisse différencier ce regard de celui provoqué par tout mouvement.*
- 2) *À 2 mois, les bébés réagissent à l'imitation de leur mère par des signaux sociaux non spécifiques, tels que regards appuyés, vocalises et sourires (Nadel & Potier, 2000).*
- 3) *Vers 5 mois apparaissent des manifestations émotionnelles intenses, comme des rires prolongés et bruyants, des pitreries (Nadel & Potier, 2000).*
- 4) *Vers 7 mois, on note l'émergence de réponses spécifiques au fait d'être imité : poursuite oculaire, répétition de l'action imitée et attente de l'action de l'autre.*
- 5) *À partir de 10 mois, on note l'émergence de stratégies de test de l'imitateur indiquant la reconnaissance explicite de son imitation : modification de l'action, de son rythme, ou de son support assorti de contrôle visuel de l'imitateur. Meltzoff (1990) les a décrits pleinement manifestes à 14 mois.*
- 6) *Vers 21 mois, l'enfant reconnaît l'imitateur, non seulement comme imitant intentionnellement mais aussi comme désireux d'utiliser l'imitation pour communiquer ; il l'engage, par exemple, dans des reproductions d'actions violant les relations d'usage entre objets et actions (Nadel, 2002).*

Figure 5 - La reconnaissance d'être imité(e)

Pour permettre l'imitation du participant par le système, nous allons maintenant nous intéresser à certains processus et algorithmes informatiques.

[Schaal, 2003] rappelle que l'imitation d'un mouvement implique différents processus complexes, incluant entre autres, la détection de pose, la reconnaissance de mouvement, la correspondance entre les coordonnées de l'espace externe et celles de l'espace interne.

Grâce aux évolutions observées dans le domaine de l'intelligence artificielle, les machines sont aujourd'hui en mesure d'apprendre de nouvelles tâches par imitation. Par exemple, apprendre à effectuer un mouvement donné, comme décrit dans le chapitre portant sur les généralités. Pour apprendre par imitation, il faut reconnaître les gestes consignés.

De nombreux modèles de représentation des gestes existent, qui peuvent être organisés en deux grands groupes : les approches en 3-dimensions et celles basées sur l'apparence [Mkhinini, 2013]. Des exemples de ce deuxième groupe de modèles sont les séquences d'images et les modèles ou « templates » 2D. Des exemples de modèles 3D sont les modèles squelettiques et les modèles volumétriques. Les modèles 2D sont moins robustes que les 3D. Par exemple, ils

sont bien plus dépendants de paramètres environnementaux, tel le point de vue de la caméra utilisée.

La figure ci-dessous synthétise les différents types et sous-types de modèles de représentation de gestes :

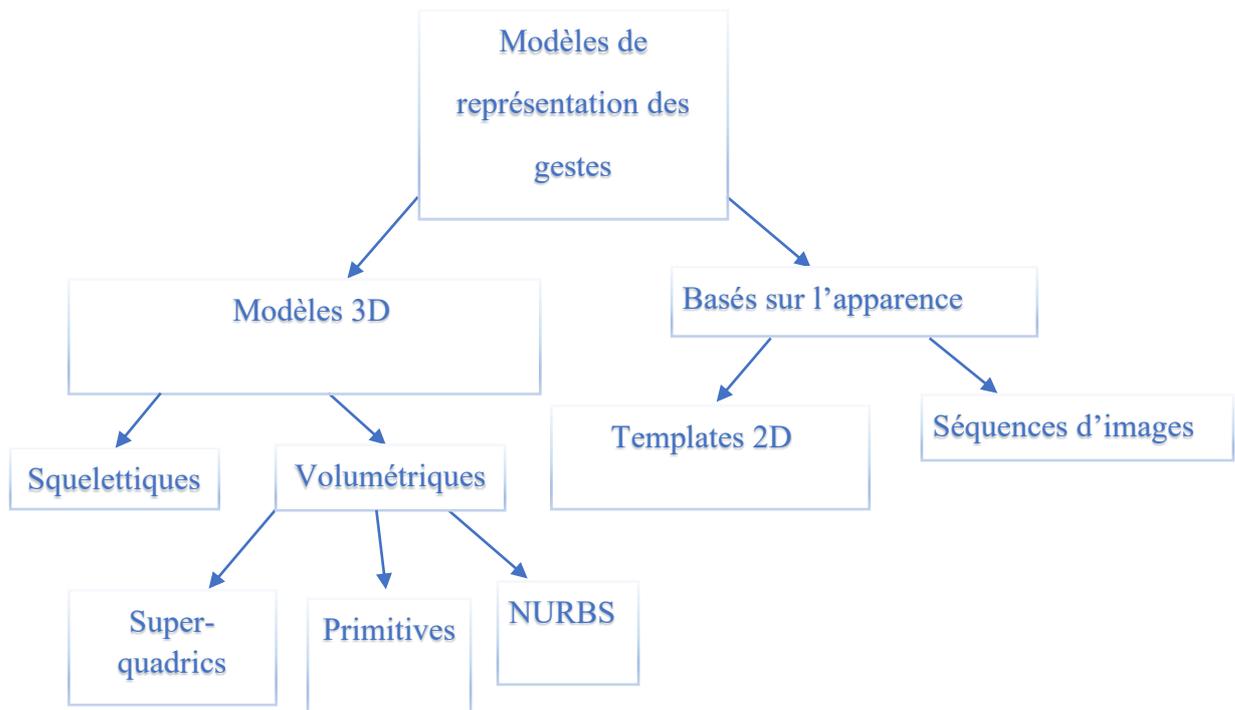


Figure 6 - Types de modèles de représentation de gestes

Aussi, il y a différents types de méthodes de reconnaissance de poses. L'efficacité de celles basées sur la vision est tributaire de l'état de l'arrière-plan de scène, de l'illumination, ainsi que du type de caméra utilisé [Hiyadi, 2016]. Mais puisque celles qui font usage d'un dispositif de contact (marqueurs du corps) sont intrusives, elles ne peuvent être utilisées avec des sujets autistes. Nous opterons donc de fait, pour une méthode basée sur la vision.

La figure ci-dessous montre les étapes de base du processus de reconnaissance de poses dans ce cas. L'acquisition de données se fait par exemple via la caméra de l'ordinateur. Un algorithme tel Openpose, peut ensuite être utilisé afin de détecter le ou les squelette(s) humain(s) sur les images. Après la normalisation des données, le système va alors tenter de déterminer à quelle pose pré-apprise correspond la pose nouvellement détectée, puis l'étiqueter comme telle.

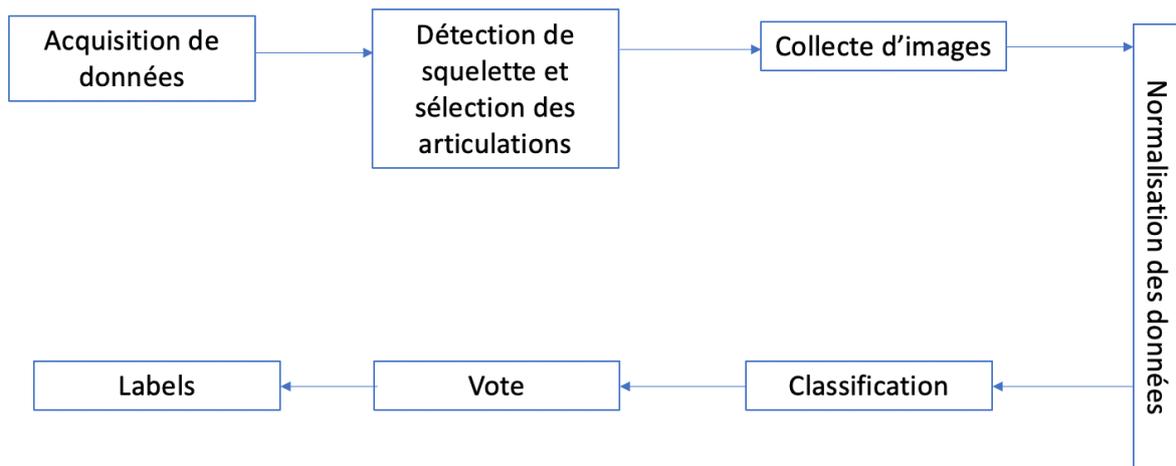


Figure 7 - Processus de reconnaissance de poses (par vision)

L'analyse de données est cruciale. Nous utiliserons le modèle suivant des cinq étapes à suivre avant toute automatisation :

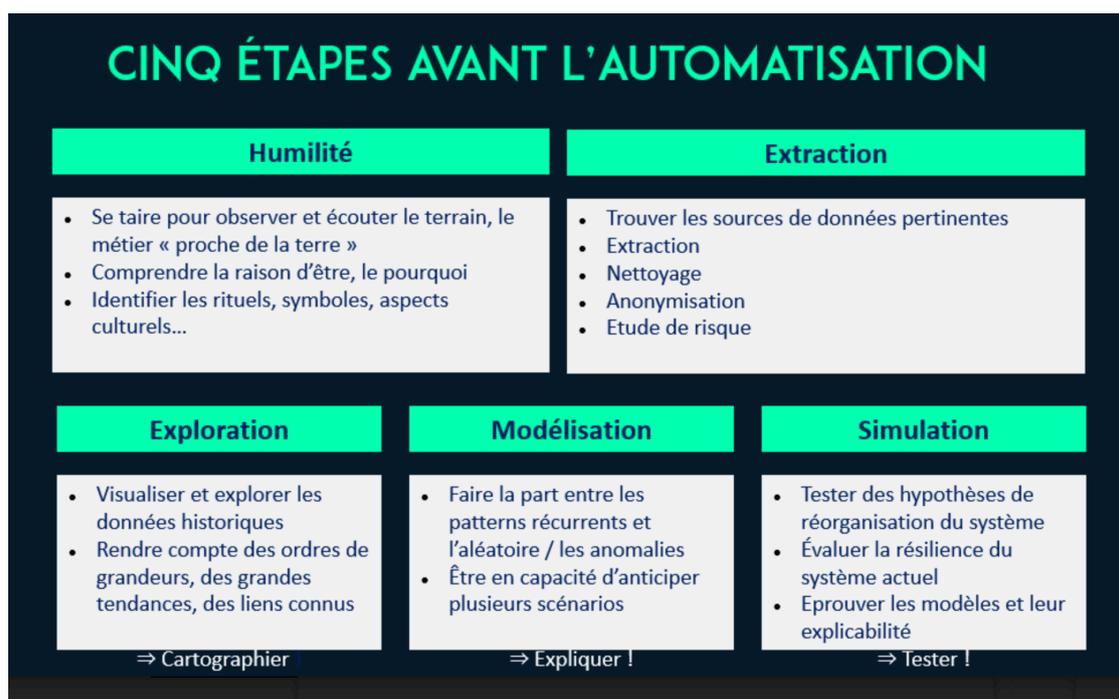


Figure 8 – Étapes avant l'automatisation

Pour une bonne représentation de gestes, la modélisation du sujet qui les exécute est importante. [Bachmann, 1999] proposait déjà un système de suivi des orientations des articulations d'un corps rigide, en vue de déterminer sa posture.

[Devanne, 2017] propose un exemple de modélisation s'appuyant tant sur les orientations que sur les positions relatives des articulations, expliquant que la combinaison de ces deux paramètres permet de mieux décrire le mouvement humain.

Une pose humaine y , à un instant t , peut être représentée par les orientations et positions de toutes les articulations du corps prises en compte. Le nombre de ces articulations est N .

Par conséquent on peut écrire :

$$y_t = [O_1, P_1, O_2, P_2, \dots, O_N, P_N] \quad (1)$$

où O_N sont les orientations des différentes articulations.

Les positions des articulations P_N ne sont pas des valeurs absolues mais des positions relatives normalisées. Elles sont calculées à partir des positions absolues p_n relativement à la position absolue p_{ss} de la colonne vertébrale.

Leur normalisation est effectuée en utilisant la longueur de la colonne L_{spine} :

$$P_N = (p_n - p_{ss})/L_{spine} \quad (2)$$

L'auteur rappelle que puisque les poses et mouvements des êtres humains sont non linéaires, l'espace euclidien ne convient généralement pas pour les représenter.

En effet, contrairement aux positions des articulations, les orientations de celles-ci ne peuvent être visualisées dans l'espace euclidien.

Des espaces alternatifs sont donc utilisés, par exemple l'espace riemannien.

Par conséquent, l'espace des poses humaines est modélisé comme le produit cartésien de la position et de l'orientation de toutes les articulations humaines :

$$\mathcal{H} = \mathbb{R}^3 \times S^3 \times \mathbb{R}^3 \times S^3 \times \dots \times \mathbb{R}^3 \times S^3 \quad (3)$$

Une fois que le corps humain est correctement modélisé, les gestes peuvent ensuite être appris par le système par observation de démonstrations successives.

Devanne explique que les méthodes probabilistes sont utiles pour atteindre cet objectif et peuvent par exemple être fondées sur des modèles spécifiques tels ceux de Markov ou les modèles à mélange gaussien.

Un modèle à mélange gaussien, en abrégé GMM, est un modèle probabiliste qui considère que tous les points de données sont générés à partir d'une composition d'un nombre fini de distributions gaussiennes, avec des paramètres inconnus.

Le modèle GMM appris représente donc une description probabiliste du mouvement cible, c'est-à-dire du mouvement idéal, auquel les différentes tentatives d'imitation sont comparées. Il est adéquat dans notre contexte d'apprentissage non supervisé, avec des classes de données pouvant se chevaucher. L'avantage du GMM par rapport à l'algorithme K-means est qu'il permet de prendre en compte une plus grande variété de clusters de données. En effet, avec K-means, c'est uniquement la moyenne de chaque cluster qui est prise en compte, et non sa variance. K-means converge donc plus rapidement que le GMM.

Puisque l'espace riemannien est non linéaire, il faut considérer des espaces tangents de référence afin de pouvoir utiliser des paramètres statistiques standard tels la moyenne ou la covariance :

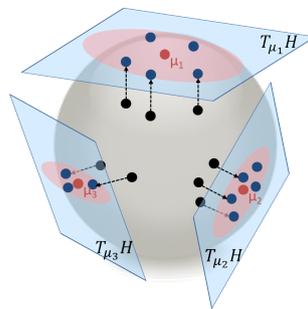


Figure 9 - Représentation de l'espace de poses humaines avec trois gaussiennes et les espaces tangents correspondants

Devanne calcule la moyenne μ des N points p_i de l'espace des poses humaines :

$$\mu = \arg \min_p \sum_{i=1}^N d(\mu, p_i)^2 \quad (4)$$

où $d(\mu, p)$ est la distance géodésique, qui peut être ainsi formulée $d(\mu, p) = \| \text{Log}_\mu(p) \|$.

μ est aussi appelée le centre de masse riemannien.

La matrice de covariance peut ensuite être obtenue, permettant l'apprentissage d'un modèle à mélange gaussien :

$$p(x) = \sum_{k=1}^K \phi_k N(x | \mu_k, \Sigma_k) \quad (5)$$

où x encode à la fois la pose humaine y_t et l'horodatage associé, K est le nombre de gaussiennes, ϕ_k le poids de la k -ième gaussienne, μ_k le centre de masse riemannien de la k -ième gaussienne, et Σ_k la matrice de covariance de la k -ième gaussienne.

Les paramètres ϕ_k , μ_k and Σ_k sont appris en utilisant la méthode d'Expectation-Maximisation sur l'espace de poses humaines [18].

Expectation-Maximisation est un outil statistique qui s'applique principalement à l'estimation par maximum de vraisemblance dans le cadre de problèmes liés aux données incomplètes.

Il existe des exemples d'application du modèle squelettique, de la représentation du corps humain dans l'espace riemannien et de l'utilisation des modèles à mélange gaussien dans le contexte d'exercices de réhabilitation physique par exemple [Devanne, 2018].

Dans ce cadre, le modèle GMM appris est le mouvement consigne effectué par le kinésithérapeute.

Les différentes tentatives de reproduction de ce mouvement par le patient sont comparées avec le mouvement cible, ce qui permet de formuler des encouragements, recommandations et orientations à l'endroit du patient.

[Vallée, 2020a] a fait référence à ce modèle et à un logiciel libre de détection de squelettes, dans le cadre de la préparation des sessions de jeu d'imitation avec des adolescents autistes avec handicap cognitif.

Dans cette section, l'importance de la pratique de l'imitation et de la reconnaissance d'être imité(e) a d'abord été mise en exergue, surtout pour les individus présentant des troubles du spectre autistique.

Puis la programmation par démonstration a été présentée. Cette brique technique est fondamentale dans le cadre d'un jeu d'imitation automatisé, dans lequel il est souhaité que le système puisse imiter le participant. D'ailleurs [Schaal, 1999] avait déjà pressenti que l'apprentissage par imitation serait crucial pour l'avènement de robots humanoïdes.

Ensuite, des méthodes techniques de détection de squelette et de reconnaissance de gestes, ont été décrites. Elles peuvent être utilisées dans des contextes divers, tel celui de la réhabilitation physique de patients. Mais dans notre cas, elles seront redirigées vers une fonction sociale. En

effet, le but de notre jeu d'imitation est d'améliorer la capacité des participants autistes à interagir avec les personnes qui les entourent.

3.3 Utilisation des jeux sérieux et robots dans la prise en charge des TSAs

De nombreux projets de recherche se sont intéressés à l'utilisation des technologies de l'information et de la communication (TIC) dans le cadre de l'accompagnement de personnes âgées, handicapées physiques ou mentales, ou encore autistes. Ces technologies permettraient par exemple de réduire le sentiment d'isolement ou d'améliorer certaines compétences.

Plusieurs études se sont penchées sur la manière dont les enfants autistes communiquent ou interagissent avec les personnes autour d'eux. Cela parce que ces deux fonctions sont fondamentales. Et comme vu précédemment, plusieurs des autres symptômes des troubles du spectre autistique constitueraient des conséquences de déficiences au niveau des interactions sociales ou de la communication.

Parmi les études faisant usage des TIC avec des enfants autistes, on distingue plusieurs catégories. Certaines se sont focalisées sur l'usage de tablettes interactives pour permettre l'acquisition de certaines connaissances par la pratique d'activités ludo-éducatives. D'autres ont fait usage de jeux sérieux, avec des avatars ou des agents virtuels intelligents. Par ailleurs, des robots interactifs ont été utilisés dans certains travaux.

3.3.1 « Serious games » pour enfants autistes

[Bernardini, 2014 ; Jouen, 2017 ; Grossard, 2017] se sont toutes trois intéressées à l'utilisation des « jeux sérieux » avec des enfants autistes, en vue d'améliorer leurs capacités d'imitation, d'attention conjointe, de reconnaissance des émotions, d'interaction sociale. [Bernardini, 2014] décrit un jeu sérieux appelé ECHOES et une intervention effectuée sur plusieurs sites en parallèle, dans le cadre de laquelle un total de 46 enfants autistes, âgés de 5 à 14 ans, ont pu améliorer leurs capacités d'interactions sociales. Cela s'est fait au travers de la pratique de certaines activités, dont des jeux d'imitation, avec un agent virtuel intelligent appelé Andy. Le jeu ECHOES est fondé sur l'intelligence artificielle et est destiné à des enfants expérimentant des conditions du spectre de l'autisme. L'agent virtuel en 3D, Andy, joue le rôle de camarade et de tuteur à la fois, en vue d'améliorer la communication sociale de ces enfants. Les interactions se font via un écran LCD doté d'une fonctionnalité de suivi du regard.



Figure 10 - Andy enseigne des compétences sociales à un enfant autiste (dw.com)

L'approche SCERTS a inspiré la conception de l'agent ECHOES ainsi que la structuration de son interaction avec l'enfant. L'acronyme signifie Social Communication (SC), Emotional Regulation (ER) et Transactional Support (TS). Il s'agit d'un ensemble de techniques visant à améliorer la communication et les capacités socio-émotionnelles des enfants autistes.

Les compétences nécessaires à l'agent virtuel sont celles généralement associées à une interaction sociale réussie :

- Communication sociale : spontanée et fonctionnelle, avec une capacité d'expression émotionnelle ;
- Régulation émotionnelle : aider l'enfant à maintenir une stabilité émotionnelle en dépit du stress quotidien, de manière à être plus disposé à l'interaction et à l'apprentissage ;
- Support transactionnel : développement d'outils à destination du personnel soignant, des parents et autres accompagnants de l'enfant.

Dans la plupart des cas, il a été noté que la probabilité que l'enfant réponde aux requêtes d'Andy a augmenté au fur et à mesure de la pratique.

Cependant, les interactions sociales initiées par l'enfant n'ont pas été impactées.

Ce sont les résultats encourageants du jeu sérieux ECHOES qui ont motivé le développement de la plateforme SHARE-IT, décrite dans [Porayska-Pomsta, 2013]. Au préalable, il a fallu

formuler, en lien avec les acteurs-clés (parents, écoles, industrie), les prérequis d'un environnement robuste et intelligent pour aider l'enfant autiste à acquérir des compétences d'interaction sociale.

Les défis principaux de SHARE-IT sont :

- Développer une architecture de système intelligent permettant un développement continu et adaptatif de jeux sérieux pour les enfants sujets à des TSA ;
- Sélectionner les technologies et techniques appropriées afin d'obtenir un outil flexible, multiplateforme et opérable même par des profanes.

Les deux études précédemment décrites contiennent des orientations utiles dans le cadre du développement d'un jeu à destination des personnes autistes. Notamment, il est fondamental de travailler avec les acteurs-clés afin de produire un outil pertinent. Le scénario du jeu d'imitation sera entièrement élaboré en lien avec des professionnels de l'autisme et des parents d'enfants autistes.

Dans l'article [Jouen, 2017] les auteurs décrivent la réalisation d'une étude exploratoire de six mois visant le développement d'une plateforme de jeux utilisable pour des interventions à domicile pour des enfants atteints de troubles du spectre autistique.

Le nom de la plateforme est GOLIAH et signifie « Gaming Open Library for Intervention in Autism at Home ». Il s'agit d'une bibliothèque de jeux en libre accès servant l'objectif indiqué. En effet, de nombreuses et régulières heures d'intervention et de pratique sont nécessaires dans l'accompagnement d'enfants atteints de TSA. L'ensemble des séances ne peut généralement pas se faire en environnement médicalisé, pour des raisons notamment logistiques et financières. Pour les interventions à domicile, les professionnels et les parents qui le souhaitent ont besoin d'outils adaptés. Les 11 jeux conçus dans le cadre de la plateforme GOLIAH se fondent sur un sous-ensemble de stimuli du modèle de Denver (Early Start Denver Model - ESDM). Il s'agit des stimuli d'imitation et d'attention conjointe pour une tranche d'âge spécifique. Rappelons que le modèle de Denver est l'un des plus couramment utilisés pour tenter d'améliorer les interactions sociales et la communication avec de jeunes enfants atteints de TSA (dont le diagnostic est généralement effectué entre trois et cinq ans). Pour atteindre ces objectifs, les modèles utilisés passent souvent par le renforcement de certaines compétences cognitives et comportementales qui sont considérées essentielles pour l'amélioration des interactions sociales et de la communication à long terme.

Ce type de protocoles d'intervention ont su montrer leur efficacité. Cependant, leur utilisation comporte quelques contraintes fortes :

- La nécessité d'adapter le protocole à chaque enfant : en effet, comme vu ensemble précédemment, le spectre des troubles du spectre autistique est extrêmement large et varié.
- Le nombre élevé d'heures de travail requis : au moins 20h d'intervention intensive par semaine.
- Les coûts pouvant découler des deux premières contraintes, en particulier si l'ensemble des interventions hebdomadaires devaient être conduites par des professionnels.

Il apparaît donc indispensable pour aider les parents dans la prise en charge de leurs enfants souffrant de TSA, de leur mettre à disposition des outils pertinents qu'ils seraient en mesure d'utiliser de manière autonome à domicile, après une période de formation par un spécialiste. Une supervision ponctuelle et régulière restant nécessaire pour s'assurer de l'utilisation adéquate desdits outils par les parents.

La plateforme GOLIAH est particulièrement utile dans un tel contexte.

Dans le cadre de l'étude exploratoire, l'équipe a travaillé avec deux groupes de sujets :

- Groupe 1 : 14 enfants atteints de TSA, âgés de 5 à 8 ans et issus de deux cliniques spécialisées
- Groupe 2 (de référence) : 10 enfants non atteints de TSA, mais ayant des caractéristiques de genre, provenance, âge et traitement de base, comparables à celles du Groupe 1.

Chaque semaine au cours des six mois d'étude exploratoire, les participants du groupe expérimental ont suivi en plus de leur traitement de base :

- 4 séances de 30 minutes à domicile avec la plateforme GOLIAH
- Une séance à l'hôpital

Les principaux résultats relevés ont été :

- La participation des enfants et de leurs parents à plus de 40% des sessions programmées
- La capacité d'utilisation par les enfants et les parents des 11 jeux de la plateforme
- L'amélioration des scores des enfants aux jeux d'imitation
- L'amélioration de leur vitesse d'exécution de la plupart des tâches proposées dans les jeux d'attention conjointe
- L'amélioration des scores des participants sur les échelles suivantes : « Autism Diagnostic Observation Schedule » (ADOS), « Vineland Adaptive Behavior Scale II » (VABS-II) for socialization, « Wechsler scales » , « Parental Stress Index » et « Child Behavior Checklist ».

Dans [Grossard, 2017], les auteurs ont parcouru trois bases de données (Medline, Science Direct, ACM Digital Library) et ont identifié 31 jeux sérieux pour autistes, dont 16 visent la production ou la reconnaissance d'émotions, et 15 les compétences sociales. Les jeux sérieux sont définis comme des « jeux et équipement numériques allant au-delà du divertissement, ayant des objectifs éducationnels ». Les auteurs affirment l'intérêt de ces jeux dans la pratique de certaines compétences mais mettent en lumière les limites des jeux existants :

- La plupart d'entre eux ne sont pas adaptés pour des individus souffrant de troubles sévères ;
- Leur validation clinique n'est généralement pas conforme aux standards médicaux ;
- Le processus de conception du jeu n'est pas souvent décrit.
- Dans de nombreux cas, il y a incompatibilité entre la validation clinique et la jouabilité/facilité d'utilisation.

Pour les études subséquentes, ils recommandent :

- Une méthodologie plus robuste (échantillons de population plus importants, groupes de contrôle, périodes de traitement plus longues, ...)
- Une collaboration plus étroite entre les cliniciens, les concepteurs et les développeurs des jeux ;
- Un focus sur des jeux adaptés pour des individus souffrant de troubles sévères.

Ces différentes plateformes logicielles de jeux sérieux sont des outils qui se sont révélés utiles dans le cadre d'un processus d'apprentissage, de divertissement, ou encore pour la prise en charge thérapeutique de certaines catégories de patients, notamment dans le domaine de la rééducation physique.

Cependant, [Tanaka, 2017] a démontré qu'avec des personnes autistes, l'utilisation d'un robot social physique est généralement plus efficace que celle d'un agent virtuel.

3.3.2 Interventions robotiques pour enfants autistes

Dans la catégorie des études démontrant l'intérêt des robots sociaux, on peut citer le projet Aurora mené à partir de 1998 dans des universités britanniques, qui a notamment étudié l'utilisation de robots dans la prise en charge thérapeutique et éducative des enfants autistes.

Il a été initié par Pr Kerstin Dautenhahn, rejointe par Dr Ben Robins. De nombreux doctorants et chercheurs post-doctoraux y ont ensuite contribué au fil des années, faisant usage de différents robots, techniques, méthodes d'évaluation, et de scénarii de jeu variés.

Le principal objectif de ce projet était d'engager des enfants autistes dans des activités leur permettant de développer les compétences nécessaires pour des interactions sociales réussies : capacité d'imitation, tour de rôle, compréhension de la relation de cause-à-effet, reconnaissance d'émotions [Dautenhahn, 1999]

Les raisons de l'utilisation de robots sociaux, plutôt que de modèles humains, pour enseigner les compétences sociales, sont la simplicité de leur comportement social et leur plus grande prédictibilité.

En effet, les êtres humains que nous sommes présentons de nombreuses subtilités dans nos comportements sociaux. Cette complexité et l'imprédictibilité associée, rendent difficile pour les enfants autistes, les interactions avec les humains. Même au sein de leurs environnements familiaux, ils ont souvent tendance à s'enfermer dans des jeux répétitifs avec des objets simples ou mécaniques. Par exemple, aligner des légos, des crayons sur le sol, puis faire jouer leur imagination pour en faire des pistes d'atterrissage ou autres lieux passionnants.

La pratique de l'interaction sociale avec un robot sert de transition afin d'amener progressivement l'enfant autiste à passer du monde prévisible et sécurisant qu'il s'est créé, au mode imprévisible et complexe de l'interaction et de la communication avec les personnes.

Pour cela, les méthodes doivent être adaptées à l'enfant. Le projet Aurora s'est penché sur le développement d'un répertoire de comportements simples que le robot peut adopter et sur l'élaboration de plusieurs scénarii de jeux interactifs.

De plus, certaines expériences [Robins et al, 2005 ; Iacono et al, 2011] ont mis en avant le rôle de médiateur que le robot peut jouer afin de permettre d'améliorer les interactions sociales entre les enfants autistes et d'autres enfants, ou avec les adultes de leur entourage. Le robot peut servir d'objet d'attention conjointe.

Les plateformes robotiques testées dans le cadre du projet sont les robots mobiles Labo-1, Pekee, IROMEK et Aibo, la poupée robotique Robota et le petit robot humanoïde Kaspar.



Figure 11 - Pekee (I) robot



Figure 12 - Plusieurs générations du robot Aibo

Pour évaluer l'évolution des compétences de communication des enfants autistes, les enregistrements vidéo des sessions sont analysés. L'analyse conversationnelle (CA pour Conversational Analysis) a été employée pour une étude approfondie.

Le projet Aurora est un projet à long-terme qui se poursuit encore aujourd'hui.

Le domaine de l'interaction homme-robot est en effet extrêmement riche et complexe, à l'intersection de l'informatique, de la robotique, de la psychologie sociale, de la science cognitive, de l'intelligence artificielle, de l'interaction homme-machine [Dautenhahn, 2007].

[Robins, 2004] fait état de l'utilisation de différents types d'outils technologiques, écrans et robots en particulier, pour l'amélioration de l'attention conjointe des enfants autistes, et donc de leurs capacités de communication et d'interactions sociales.

L'attention conjointe est une interaction à valeur communicative entre soi et l'autre. Cette compétence apparaît chez l'enfant dès sa première année.

Il s'agit de regarder un objet, puis une personne, puis d'alterner entre les deux pour manifester son intérêt pour l'objet et attirer l'attention de la personne sur cet objet. A l'inverse, c'est également regarder ce qu'une autre personne regarde (ou pointe) pour communiquer à propos d'un objet.

En termes de pointage on distingue :

- Le pointage proto-impératif, dont le but est d'obtenir un objet hors d'atteinte, et donc équivalent à une demande d'aide : « je veux », « j'aimerais », « donne-moi »
- Le pointage proto-déclaratif, dont le but est de susciter un commentaire de l'interlocuteur à propos de cet objet et donc équivalent à une demande de dénomination : « regarde »
- Le pointage informatif, dont le but est d'informer l'autre sur la position d'un objet, en réponse à la question « où est-il ? »

Ces différents types de pointage participent au développement de l'attention conjointe.

L'article décrit des expériences ayant prouvé que l'utilisation d'ordinateurs dans le processus d'éducation des enfants autistes, ou d'autonomisation des adultes autistes, est importante. Effectivement, l'écran sert de canal d'attention et permet à l'individu de se focaliser sur le sujet, en faisant abstraction des événements de l'environnement qui auraient pu constituer des sources de distraction.

[Duquette, 2008] a proposé une étude exploratoire avec quatre enfants autistes à bas niveau de fonctionnement. Deux d'entre eux étaient appariés avec un médiateur humain, les deux autres avec un robot médiateur. Les activités proposées allaient de l'imitation corporelle à celle d'expressions faciales, en passant par l'imitation d'actions familières. Les deux enfants travaillant avec le robot médiateur ont fait preuve d'une attention conjointe croissante, mesurée par la proximité physique et le contact visuel. De plus, ils ont plus imité les expressions faciales (sourires) que les enfants travaillant avec un médiateur humain.

[Fridin, 2014] propose une expérimentation qui compare les performances de deux groupes d'enfants d'une école maternelle, dans l'imitation de tâches motrices.

Le premier groupe, dit expérimental, est constitué de neuf enfants d'environ 3 ans, parmi lesquels trois garçons et six filles. Tout d'abord, ce groupe participe à une session de prise de contact avec le robot social. Sept jours plus tard, les neuf enfants sont invités individuellement à une deuxième session avec le robot, au cours de laquelle celui-ci les invite à reproduire des séquences de mouvements. Le type de mouvements et le niveau de complexité évoluent progressivement au cours de la session. Trois niveaux de difficulté sont proposés et, pour chacun, deux mouvements à imiter.

Si un mouvement n'est pas exécuté par l'enfant, ou l'est partiellement, le robot lui demande de réessayer (2^{ème} tentative).

Enfin, une semaine plus tard, les enfants de ce même groupe participent à une session similaire mais menée par un agent virtuel.

Le second groupe, dit de contrôle, est constitué de quatre enfants du même âge, parmi lesquels deux garçons et deux filles. Ceux-ci ne participent qu'à la session menée par l'agent virtuel.

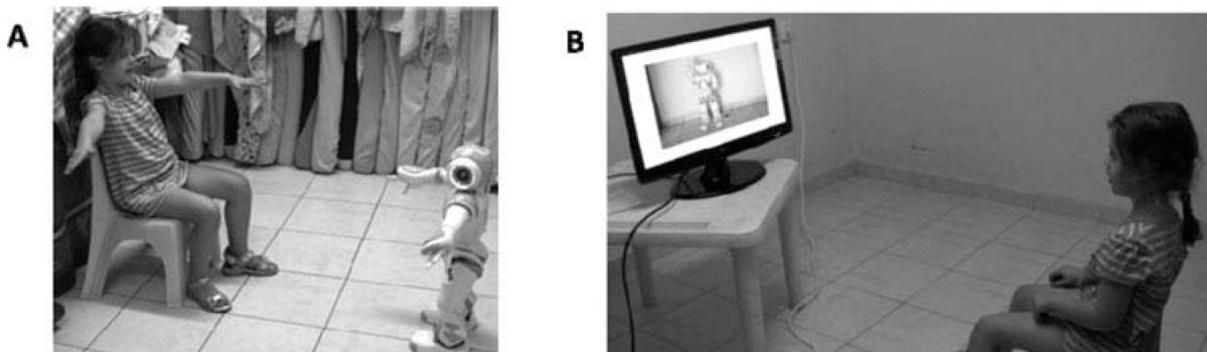


Figure 13 - Illustration des séances avec un robot physique et un robot virtuel

Les sessions sont filmées et les vidéos analysées par la suite.

Deux paramètres sont alors mesurés : IL pour le niveau d'interaction sociale, et P pour le niveau de performance lors de l'exécution du mouvement.

IL est calculé à partir du niveau du contact visuel entre l'enfant et le robot, appelé EC, et le type d'expression émotionnelle F, à savoir faciale (niveau 1), corporelle (niveau 2) ou vocale (niveau 3) :

$$IL_s = EC_s * Sign_s * \sum_{F=1}^3 W_F F \quad (6)$$

L'indice s représente chaque segment, c'est-à-dire chaque tâche demandée à l'enfant.

W_F est une variable binaire (0 ou 1) indiquant si chaque type d'expression émotionnelle est présent.

$Sign_s$ est également une variable binaire (-1 ou 1) indiquant si l'interaction sociale est positive ou négative.

L'évaluation de la performance est réalisée sur la base de l'échelle présentée ci-dessous :

Échelle d'évaluation de la performance motrice induite	
Code (P)	Performance motrice
0	Pas de réponse
1	Tentative (au 2 nd essai)
2	Performance incomplète (au 2 nd essai)
3	Tentative (au 1 ^{er} essai)
4	Performance complète (au 2 nd essai)
5	Performance incomplète (au 1 ^{er} essai)
6	Performance complète (au 1 ^{er} essai)

Tableau 3 - Niveaux de performance motrice provoquée

Les résultats des deux groupes sont ensuite comparés.

Il apparaît clairement que le premier groupe, celui qui travaille avec un robot physique, puis un agent virtuel, obtient de meilleurs résultats.

Dans le cadre de nos travaux, nous tirerons parti de la formule proposée pour l'évaluation de l'interaction sociale, mais en tenant compte également de l'évolution de la distance, et en approximant le paramètre « contact visuel » par celui d'orientation de la tête. En effet, les systèmes d'oculométrie, utilisés pour le suivi du regard, peuvent être des facteurs de distraction ou de gêne pour les personnes présentant des troubles du spectre autistique.

[Pinto da Costa, 2018] montre que l'usage de robots sociaux avec des enfants autistes aboutit à plus d'attention vers le robot et moins de comportements répétitifs et stéréotypés.

L'efficacité des robots dans la prise en charge thérapeutique et éducative des enfants autistes, serait dû au fait que le côté mécanique, prévisible et stable du robot rassureraient ces enfants.

Considérons l'exemple d'un adulte qui essaierait d'obtenir qu'un enfant effectue un certain mouvement ou prononce un certain mot.

Au bout de plusieurs tentatives infructueuses, des signes d'impatience, même très subtils, pourraient apparaître sur le visage de l'adulte, causant un stress ou un malaise à l'enfant autiste. A l'inverse, le « comportement », les actions du robot sont plus prévisibles et l'absence d'expressions du visage participe à une certaine stabilité rassurante ressentie par l'enfant autiste.

Plusieurs études insistent sur la nécessité de configurations tripartites en mettant en avant les bénéfices de la structure patient-accompagnant-robot [Robins, 2014; Costescu, 2015].

En effet, le robot, loin de remplacer l'humain, représente un objet d'attention conjointe entre l'enfant et l'adulte. Robins insiste bien sur le rôle de « médiateur social » du robot qui en aucun cas ne remplacerait le thérapeute ou l'accompagnant humain.

En utilisant des techniques de pointage vers le robot, l'adulte est capable d'établir une forme de communication avec l'enfant autiste.

Tous les aspects de l'interaction sociale peuvent alors se manifester : expression vocale, prosodie (tonalité, intonation...), regard, gestuelle.

[Pennisi, 2015] et [Costescu, 2015] montrent que de nombreux tests se sont montrés plus concluants en présence d'un robot et d'un accompagnant humain, qu'en présence d'un accompagnant humain seul. Pennisi relève l'existence de comportements sociaux des enfants atteints de TSA vers les robots, ainsi que la diminution de leurs attitudes stéréotypées en présence de robots. Il indique que ces derniers facilitent significativement les interactions entre les « enfants TSA » et les thérapeutes et chercheurs. Cependant il insiste sur le fait qu'un approfondissement des travaux serait nécessaire pour, d'une part évaluer l'impact sur les résultats des facteurs âge, sexe et quotient intellectuel, et d'autre part déterminer si les résultats obtenus au cours de la « session robotique » se prolongent au-delà, en dehors du contexte clinique.

Le type de configuration tripartite décrit précédemment permet d'adresser une préoccupation de certains pédopsychiatres selon laquelle l'usage de robots humanoïdes dans la prise en charge des personnes autistes comporterait un risque "d'enfermer davantage le patient autiste dans sa bulle".

[Coeckelbergh, 2015] aborde les préoccupations d'ordre éthique et d'acceptabilité sociale que pose l'utilisation de robots dans la prise en charge d'enfants TSA. Il encourage l'usage de robots

à « autonomie supervisée » et propose une étude suggérant que l'utilisation de robots zoomorphiques serait moins problématique que celle de robots humanoïdes.

Les usages des robots sont de plus en plus diversifiés.

[Dickstein-Fischer, 2014] présente le robot PABI qui, en plus d'avoir un usage thérapeutique, peut être utilisé pour le diagnostic précoce des troubles du spectre autistique.

Par ailleurs, l'importance de développer en amont des canevas descriptifs des sessions robotiques est abordée par [Huijnen, 2017]. Les co-auteurs Huijnen, Lexis, Jansens et De Witte décrivent une méthodologie de travail qui leur aura permis :

- D'une part, de collecter les prérequis fondamentaux à prendre en compte pour l'inclusion de robots dans le cadre de sessions thérapeutiques avec les enfants autistes ;
- D'autre part, de concevoir un canevas pour la description d'interventions thérapeutiques faisant usage d'un robot (KASPAR en particulier).



Figure 14 - Le robot humanoïde KASPAR

Pour la collecte des prérequis, ils ont d'abord travaillé avec 73 participants (des professionnels et des adultes autistes) organisés en 13 groupes thématiques, dont chacun a tenu une session de travail de 2h. Ces treize sessions auront permis de mettre en exergue des prérequis portant sur l'environnement aussi bien que sur les utilisateurs, le robot lui-même et l'implémentation pratique. Notamment, il apparaît important que l'utilisation du robot s'intègre dans un plan d'intervention global et que les objectifs thérapeutiques soient clairement définis. Concernant les enfants qui pourraient en bénéficier, des caractéristiques ont été relevées telles que : un âge d'au moins quatre ans, l'existence de difficultés socio-émotionnelles, d'interactions sociales ou

de communication verbale/gestuelle, une appétence vis-à-vis de la technologie. Aussi, les professionnels doivent être au préalable formés à opérer le robot afin qu'il ne représente pas un frein dans le processus. Certaines caractéristiques du robot lui-même ont été identifiées comme importantes, notamment l'apparence, le type de voix, le rythme et la cohérence de ses mouvements. Dans le cadre de l'implémentation pratique, le type de sessions (nombre d'intervenants, disposition, degré de structuration) a également été abordé.

Pour l'établissement d'un canevas de description d'intervention, les co-auteurs ont travaillé avec 22 participants parmi lesquels des professionnels de l'autisme, des parents d'enfants atteints de TSA et des adultes autistes.

Il est ressorti de ce travail que chaque intervention devrait avoir un libellé et que les objectifs thérapeutiques et/ou éducatifs concernés devraient être sélectionnés dans une liste standard (ex : amélioration de la capacité d'imitation, de la communication verbale, de contact visuel, développement de la capacité à s'amuser, etc...) Les buts spécifiques visés par l'intervention devraient également être clairement définis. Il faudrait ensuite prévoir une section de caractérisation détaillée de l'enfant qui participera à l'intervention : âge, genre, niveau d'opération, spécificités. La session également devrait être caractérisée (individuelle/de groupe, lieu, durée, fréquence, degré de structure, intervenants) avant d'être effectivement décrite en termes de scénarii, observations, mesures, résultats, perspectives, code informatique et autres outils utilisés.

Dans le cadre de l'amélioration des interactions sociales avec les enfants autistes par l'usage de la robotique, ce type de canevas d'intervention pourra être utilisé pour mieux structurer le travail et faciliter l'évaluation des différentes sessions ainsi que leur analyse comparée.

[Costa, 2018] relate une étude qui visait à démontrer que l'usage de QTrobot, un robot assistant social, dans des interventions avec des enfants présentant des troubles du spectre autistique, est utile. Costa a travaillé avec 15 enfants âgés de 4 à 14 ans et diagnostiqués autistes. Deux types d'interactions courtes leur ont été proposées : l'une avec un humain et l'autre avec le robot. Les résultats de cette étude ont été que les participants étaient plus attentifs au robot qu'à la personne ; qu'ils ont autant imité le robot que la personne ; et qu'ils ont affiché moins de comportements stéréotypés pendant l'interaction avec le robot qu'avec l'humain.

Cette étude était la première avec le QTrobot et a abouti à des résultats encourageants. QTrobot sera inclus dans l'analyse comparative qui mènera au choix du robot à employer dans le cadre de nos travaux.

La prédictibilité (modérée) des robots est un argument courant en faveur de leur utilisation dans le cadre d'intervention pour des enfants ayant des troubles du spectre autistique.

Des travaux ont été menés afin de déterminer quels facteurs affectent le niveau de prédictibilité (du point de vue de l'enfant), comment ils peuvent être pris en compte dans la conception de l'interaction et comment ils impactent l'interaction [Schadenberg, 2021].

L'un des facteurs serait le fait pour l'enfant de voir la cause d'un comportement du robot ou d'identifier des actions anticipatoires au sein de l'interaction (exemple : fixer un objet pendant deux secondes avant d'aller le saisir).

Cependant, il apparaît positif d'avoir une certaine imprédictibilité dans l'interaction (exemple : un robot capable de détecter une perte d'attention du participant et par conséquent d'adapter son comportement).

Les expériences de Schadenberg ont été menées avec des adultes TD (qui se développent typiquement) et TSA, ainsi que des enfants TSA. Des travaux ont dû être menés avec des adultes car les mesures de prédictibilité requièrent des capacités cognitives suffisantes. Néanmoins, la population cible reste des enfants TSA avec un retard mental et des troubles du langage.

Un sondage [Mazon, 2018] sur l'autisme et les interventions faisant usage des technologies, propose une analyse critique de 31 études et relève plusieurs limitations. Parmi les 31 études, 23 visent l'efficacité thérapeutique (TE – Therapeutic Effectiveness), six se focalisent plutôt sur l'ergonomie, la facilité d'utilisation de la technologie (TU – Technology usability), et deux considèrent les deux aspects à la fois (études dites TE-TU).

Cette étude met en avant la nécessité de méthodologies plus robustes, avec des scénarii de tests plus détaillés. Elle insiste sur l'importance d'une évaluation moins subjective et la nécessité de vérifier la validité externe aussi bien qu'interne. De plus, la majorité des études portent sur des enfants autistes. Il y a donc un réel besoin d'études ciblant des adolescents atteints de troubles du spectre autistique. Les résultats de ce sondage nous ont décidé à nous focaliser sur cette population.

3.4 Jeux de données utiles en interaction humain-robot

Des applications mobiles ont été utilisées dans le cadre du diagnostic de l'autisme. Elles sont pratiques et utiles, au vu du fort taux de pénétration de la téléphonie mobile dans le monde. Cependant, un diagnostic approfondi et des traitements avancés requièrent des informations et formes d'interaction autres que celles permises via ces applications. Par exemple, afin de mieux comprendre les troubles du spectre autistique et de développer des outils innovants et adaptés, il est indispensable d'acquérir une maîtrise des comportements et interactions sociales des sujets concernés. [Anzulewicz, 2016] démontre l'importance d'une approche analytique de l'autisme, fondée sur des jeux de données. Il propose une analyse automatisée de la cinématique des mouvements, des forces des gestes enregistrés avec 82 enfants âgés de trois à six ans, dont 37 diagnostiqués autistes. Cette analyse a révélé des différences fondamentales et systématiques entre la dynamique des gestes au sein du groupe des enfants autistes et au sein du groupe des neurotypiques. Le jeu de données utilisé n'a en revanche pas été rendu public.

Cependant, il en existe d'autres, en dehors du monde de l'autisme, qui sont importants dans le cadre de l'analyse de l'interaction sociale en général : « Tower Game Dataset », « UE-HRI » et « PInSoRo ».

Le jeu de données « Tower Game » comprend des enregistrements multimodaux obtenus avec 39 adultes jouant au jeu du même nom. 112 sessions annotées, d'une durée moyenne de trois minutes, ont été collectées. L'annotation s'est faite en utilisant des ESIPs (Essential Social Interaction Predicates). Les interactions sociales observées sont dyadiques et très riches. Le jeu de données comprend des mesures approximatives de squelettes humains détectés et de direction du regard.

« UE-HRI » [Ben-Youssef, 2017] est un dataset qui se focalise sur l'interaction humain-robot. Il comprend des enregistrements audio et vidéo de 54 participants adultes impliqués dans un dialogue spontané avec le robot social Pepper, dans un lieu public. Les interactions comprennent des échanges dyadiques et de groupe.

« PInSoRo » [Lemaignan, 2018] est un jeu de données public portant sur des interactions entre des enfants neurotypiques et des robots, couvrant 45h d'enregistrements vidéo RGB et 3D des visages, squelettes, échanges verbaux et interactions dans le cadre du jeu. En sus, des annotations manuelles sur l'attitude, ainsi que le niveau d'engagement social et dans une tâche donnée.

Le dataset « DREAM » [Billing, 2020] est issu d'une évaluation clinique de RET (Robot-Enhanced Therapy) menée entre mars 2017 et août 2018 en Roumanie. 76 enfants, âgés de trois à six ans, ont été recrutés pour l'étude mais 70 ont répondu aux critères d'inclusion. Ils ont été répartis entre les deux groupes : RET et SHT (thérapie standard avec un humain), qui ont suivi un protocole constitué de huit interventions, précédées et suivies d'une évaluation par ADOS (Autism Diagnostic Observation Schedule). Le jeu de données est constitué de données secondaires et non brutes : identifiants numériques, genre, âges (en mois) et scores ADOS initiaux des enfants, informations de squelettes 3D (articulations de la partie supérieure du corps), données sur la position et l'orientation de la tête, ainsi que les résultats du suivi du regard. En sus, les types de tâches thérapeutiques (attention conjointe, imitation ou tour de rôle) et l'horodatage des enregistrements. « DREAM » est le premier jeu de données aussi robuste qui ait été rendu public, dans le domaine qui nous concerne.

Mais comme la majorité des datasets liés à l'autisme et à l'interaction humain-robot, il porte uniquement sur des enfants. Nous avons entrepris de développer un jeu de données portant sur des adolescents autistes avec déficit intellectuel.

3.5 Conclusion du chapitre 2

Dans ce chapitre, l'importance de la pratique de l'imitation et de la reconnaissance d'être imité(e) a d'abord été mise en exergue, surtout pour les individus présentant des troubles du spectre autistique.

Puis la programmation par démonstration a été présentée. Cette brique technique est fondamentale dans le cadre d'un jeu d'imitation automatisé, dans lequel il est souhaité que le système puisse imiter le participant. D'ailleurs [Schaal, 1999] savait déjà pressenti que l'apprentissage par imitation serait crucial pour l'avènement de robots humanoïdes. Des méthodes techniques de détection de squelette et de reconnaissance de gestes, ont été décrites. Elles peuvent être utilisées dans des contextes divers, tel celui de la réhabilitation physique de patients. Mais dans notre cas, elles sont redirigées vers une fonction sociale. En effet, le but de notre jeu d'imitation est d'améliorer la capacité des participants autistes à interagir avec les personnes qui les entourent.

Ensuite il a été proposé une revue d'études portant sur des interventions utilisant des jeux sérieux, des agents virtuels et des robots sociaux, dans le cadre de la prise en charge de personnes autistes. L'intérêt de l'usage des robots sociaux a été démontrée.

Enfin, un état de l'art des jeux de données, liés à l'autisme et à l'interaction humain-robot, a été présenté.

Nous travaillerons au développement d'un système socio-technique adaptatif, incluant un robot assistant, pour la pratique de l'imitation avec des adolescents présentant des troubles du spectre autistique. Nous nous appuierons sur les recommandations qui ont été formulées, relativement à la conception et à l'implémentation d'interventions robotiques auprès de personnes autistes. Il s'agit notamment de l'importance de la détermination préalable de la durée et des objectifs de chaque session, ainsi que du ou des rôle(s) joué(s) par le robot.

Enfin, nous produirons un jeu de données.

CHAPITRE 3 :
PROBLEMATIQUE, HYPOTHESES ET
MÉTHODOLOGIE

4 CHAPITRE 3 - PROBLÉMATIQUE, HYPOTHÈSES ET MÉTHODOLOGIE

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons notre problématique, nos hypothèses puis nous exposerons la méthodologie de recherche.

Il nous faudra notamment préciser la population cible de nos travaux, les méthodes et outils employés, les précautions à prendre, les paramètres à mesurer.

Il sera également nécessaire de décrire précisément les séances expérimentales qui seront menées.

Chacun des choix opérés devra être justifié.

4.2 Problématique et hypothèses

Dans le cadre de nos travaux, la problématique est formulée comme suit :

La pratique d'un jeu d'imitation gestuelle, implémenté via un robot d'assistance, permet-elle de susciter des interactions sociales avec des adolescents présentant des troubles du spectre autistique et un déficit intellectuel ?

Plusieurs verrous scientifiques ont été identifiés :

- Quand considérer qu'il y a imitation avec la population que l'on cible ?
- Comment définir et modéliser le niveau des interactions sociales ?

Il existe également des verrous opérationnels. Par exemple :

- Comment mesurer les paramètres choisis de manière simple et efficace ?
- Comment, en cette période de pandémie, avoir accès à un nombre suffisant de participants correspondant aux critères d'inclusion, et mener une expérimentation sur au moins six mois ?
- Comment se procurer un robot suite à l'annulation de notre bourse de doctorat initialement accordée par le SCAC de l'Ambassade de France en Côte d'Ivoire ?

Sur la base de la problématique formulée, nous émettons les hypothèses suivantes :

1. L'imitation induite/provoquée est possible avec des adolescents atteints de TSA et avec déficit intellectuel (en Côte d'Ivoire - CIV) ;
2. Un algorithme d'intelligence artificielle standard peut être utilisé, en environnement réel, pour détecter les poses d'adolescents atteints de TSA (CIV) ;
3. L'usage de la robotique interactive permet de stimuler une imitation réciproque.
4. Le système conçu permet de susciter des interactions sociales avec les adolescents atteints de TSA et avec déficit intellectuel.

4.3 Approche méthodologique

Notre approche est didactique et vise des changements positifs de comportements à moyen et long terme.

Le développement des capacités d'interactions sociales en environnement contrôlé, devrait ensuite pouvoir être décontextualisé et généralisé, afin que les interactions sociales de l'adolescent autiste avec son entourage, au quotidien, soient améliorées peu à peu.

Dans le périmètre de cette thèse, nous ferons usage des outils suivants :

- Un sondage sur la base d'un questionnaire à destination de personnes accompagnant des adolescents autistes
- Des entretiens semi-directifs avec des professionnels de l'autisme et des parents d'adolescents autistes
- Des sessions expérimentales

La démarche est donc mixte, à la fois qualitative (entretiens interactifs, observations lors de l'expérimentation) et quantitative (questionnaire, mesure de paramètres précis au cours des sessions expérimentales).

Des séances d'échanges doivent avoir lieu régulièrement avec des parents de personnes autistes, pédopsychiatres et éducateurs spécialisés, dans le but de rester connecté(e) avec les besoins et défis rencontrés au quotidien par les accompagnants de personnes autistes. Cela est crucial afin

de mettre en place un environnement adéquat et proposer un système réellement utilisable et utile.

4.3.1 Population cible

Le choix de la population cible est effectué en tenant compte du fait que très peu d'études ont porté sur l'introduction de technologies de l'information et de la communication auprès d'adolescents ayant des troubles du spectre autistique [Mazon, 2018].

De plus, des professionnels de l'autisme sont interviewés afin de recueillir les besoins d'accompagnement dans le cadre de la prise en charge des adolescents autistes notamment, avec un déficit intellectuel (comorbidité).

On décide alors de cibler des personnes :

- d'âge biologique compris entre 11 et 19 ans ;
- d'âge neurodéveloppemental compris entre 6 et 36 mois, ce qui implique nécessairement un déficit intellectuel sévère ;
- diagnostiquées autistes, selon l'échelle CARS, ADI-R ou ADOS

4.3.2 Questionnaires, canevas de séances et protocoles de consentement

Dans le cadre de nos travaux, on définit une séance expérimentale comme une expérimentation unitaire, avec une configuration et des objectifs précis, d'une durée de quelques minutes.

Une session expérimentale est un ensemble de séances menées dans le courant d'une même journée.

Une phase expérimentale peut contenir une session ou plus, et s'étendre sur une période plus ou moins longue.

4.3.2.1 Questionnaires

Avant l'élaboration des sessions expérimentales, un questionnaire a été développé et transmis à quatre professionnels de l'autisme et quatre parents d'adolescents autistes, contenant des questions sur :

- leur expérience d'accompagnement des adolescents autistes ;
- leurs avis quant aux caractéristiques des sessions expérimentales à venir ;
- leur perception de l'intérêt d'un robot interactif dans la prise en charge d'adolescents autistes.

Le questionnaire est disponible en [Annexe 1](#).

4.3.2.2 Canevas de séance

Conformément aux recommandations contenues dans [Huijnen, 2017] des canevas descriptifs des sessions et séances ont été préparés, contenant notamment les informations suivantes :

- identifiants de la séance et de la session qui la contient
- données spatio-temporelles : lieu, date, horaires
- objectifs
- identifiants et descriptions des participants
- paramètres à superviser
- observations
- synthèse des résultats obtenus

Ces fiches sont importantes pour une bonne préparation et une cohérence entre les différentes séances expérimentales.

Elles permettent également de mieux formuler le descriptif synthétique de séance, pour transmission aux représentants légaux des participants, en vue d'obtenir leur consentement.

Le format de canevas de session utilisé est disponible en [Annexe 2](#).

4.3.2.3 Formulaire de consentement

Peu avant le début des expérimentations, des formulaires de consentement ont été préparés et transmis aux représentants légaux des participants.

Ils comprenaient un descriptif du contexte des sessions expérimentales, suivi d'une section de consentement et autorisation.

Il était attendu des représentants légaux qu'ils parcourent le document, formulent leurs éventuelles interrogations afin qu'elles soient discutées, puis indiquent la date et apposent leurs nom, prénom et signature, au bas du formulaire.

Le protocole de consentement est disponible en Annexe 3.

4.3.3 Environnement, durée et rythme des séances

Certains prérequis environnementaux ont été identifiés lors des entretiens menés.

L'environnement de la séance devait être calme et si possible familier.

Lorsque des participants autistes sont impliqués, il convient de préparer la salle d'expérimentation en simplifiant l'environnement, en retirant le maximum de sources potentielles de distraction. Si possible, les fenêtres peuvent être fermées et les stores baissés, afin d'éviter que l'attention ne se porte sur des objets ou mouvements extérieurs.

La durée globale du jeu ne devait pas excéder quelques minutes car les personnes autistes sont souvent atteintes d'un déficit d'attention [Sokolova, 2017]. Dans notre cas, le nombre maximal de minutes est fixé à 5. Il faut, dans chaque situation, s'adapter au(x) participant(s).

Il fallait prévoir des pauses de longueur adaptée.

Quant au nombre et à la fréquence de séances à prévoir, un rythme de deux sessions par semaine avait été convenu, sur une période d'au moins six mois, soit une cinquantaine de séances.

Le contexte sanitaire et les contraintes temporelles de la thèse ont néanmoins impliqué de s'adapter.

Pour la phase expérimentale 3, il y a eu cinq à sept séances par jour pendant trois jours.

Nous avons veillé à ce que la durée de chaque séance n'excède pas cinq minutes.

Entre deux séances successives, une pause a systématiquement été observée, pendant laquelle nous avons veillé à ce que la participante change d'environnement et de perspective, par exemple en bénéficiant d'une promenade de quelques minutes ou en prenant son goûter dans une salle annexe.

4.3.4 Jeux de données (datasets)

La diversité des troubles du spectre autistique implique une hétérogénéité dans les données. Or sans données qualifiées, on ne peut pas faire tourner de modèle. Il est donc indispensable de constituer un jeu de données adéquat, sur lequel pratiquer ensuite un apprentissage, supervisé ou non.

Une première approche, celle que nous avons naturellement adoptée, est de constituer un dataset sous la forme d'un répertoire renfermant plusieurs dossiers.

Chaque dossier correspond à un geste donné et contient des vidéos du geste en question ainsi que des sous-dossiers.

Un geste étant constitué de plusieurs poses, chaque sous-dossier correspond à une pose précise et comprend un nombre suffisant de photos de la pose concernée.

Cette approche avait au préalable été utilisée, par exemple dans le cadre de la reconnaissance de gestes lors de séances robotisées de kinésithérapie [Devanne, 2017].

Cependant, dans notre cadre de travail avec des adolescents autistes TSA + DI, la diversité des mouvements réponses est très grande. C'est seulement au fur et à mesure du déroulement des séances expérimentales successives, que nous avons pu prendre la pleine mesure de l'importance de ce facteur de complexité. En apprentissage supervisé, il nous faudrait, pour chaque pose et pour chaque geste, un très grand nombre de photos et de vidéos respectivement. La littérature et l'expérience terrain recommandent de disposer d'au moins mille lignes par élément, donc dans notre cas, mille images pour chacune des poses constituant chaque geste à imiter.

Une autre approche est l'élaboration d'un algorithme capable, à partir d'un nombre d'images plus restreint, d'inférer un jeu de données plus robuste.

Par exemple, considérons un geste de salutations standard, décomposé en trois poses (main ouverte verticale, orientée vers la gauche et orientée vers la droite). Nous pourrions, en tenant compte des paramètres de position et orientation des articulations, ainsi que de la combinaison des états de chacun des doigts (tendu ou plié), générer des centaines de variantes pour chacune des trois poses pré-identifiées.

Le riche dataset résultant de cette opération permettrait une reconnaissance automatisée des tentatives, ou « intentions » d'imitation, de la part de participants autistes avec déficit intellectuel.

Un tel algorithme offrirait une plus grande tolérance, plus d'indulgence dans l'évaluation de la qualité d'une imitation, ou du moins dans la détection de tentatives (même infructueuses) d'imitation, de la part d'une population neuro-atypique. Il se révélerait très utile dans le cadre de nombreux domaines d'application.

Cette deuxième approche est une contribution importante dans le cadre de nos travaux.

Par ailleurs, dans le cadre de nos expérimentations successives, nous avons constitué un jeu de données composé d'enregistrements audio et vidéos de séances de pratique ludique de l'imitation gestuelle avec sept préadolescents et adolescents autistes avec déficit intellectuel.

Le dataset comprend également les âges biologiques, âges neurodéveloppementaux, scores CARS ou ADOS et niveaux de quotient intellectuel quand disponibles.

De plus, les valeurs des paramètres de mesure retenus, comme décrits dans la section concernée.

4.3.5 Description des phases expérimentales

Afin de susciter des interactions sociales avec la population ciblée, nous avons entrepris de pratiquer l'imitation gestuelle de façon ludique.

Pour ce faire, plusieurs phases ont été nécessaires de manière à séparer les différentes couches de difficultés.

4.3.5.1 Phase expérimentale 1

Lors de cette phase, il s'est agi de sélectionner un algorithme de détection de poses et de l'évaluer en environnement réel, avec des sujets non autistes. Ceci afin de se familiariser avec l'environnement technique associé et déterminer les précautions à prendre afin de permettre une bonne détection des poses humaines. Cette première phase sera libellée « Phase expérimentale 1 ».

Elle s'est déroulée à Abidjan (Côte d'Ivoire), à domicile.

Les seules précautions particulières prises ont été d'avoir :

- un niveau d'éclairage suffisant
- un décor épuré, avec un fond uniforme

L'opérateur technique, nommé « Assistant A », était chargé d'opérer l'ordinateur sur lequel était installé l'outil de détection de poses, et d'effectuer les captures d'images utiles.

Les participants étaient au nombre de quatre : deux hommes adultes, une adolescente et un petit garçon.

Plusieurs algorithmes, méthodes et outils de détection de poses existent et sont couramment utilisés pour divers types d'applications. De nombreuses expériences ont par exemple été effectuées avec la caméra Kinect. Dans certains cas de figure, des marqueurs ont été positionnés sur les sujets afin de faciliter la détection des poses.

Pour ce qui est de notre population cible, des adolescents présentant des troubles du spectre autistique, l'utilisation de marqueurs est exclue, étant donné qu'ils constituent des facteurs importants de gêne et/ou de distraction pour eux. On opte donc pour la vision par ordinateur.

Des tests techniques ont été nécessaires pour se familiariser avec les algorithmes de détection de squelettes et de reconnaissance de poses.

N'ayant pas de robot physique disponible, nous avons utilisé le logiciel Chorégraphe, qui permet la simulation de robots Nao et Pepper.

La figure ci-dessous est une capture d'écran montrant d'une part, le logiciel Chorégraphe avec le robot Nao effectuant la pose consigne « Bras-tendus », et d'autre, le participant dont le squelette est détecté par l'algorithme Openpose, et la posture reconnue.

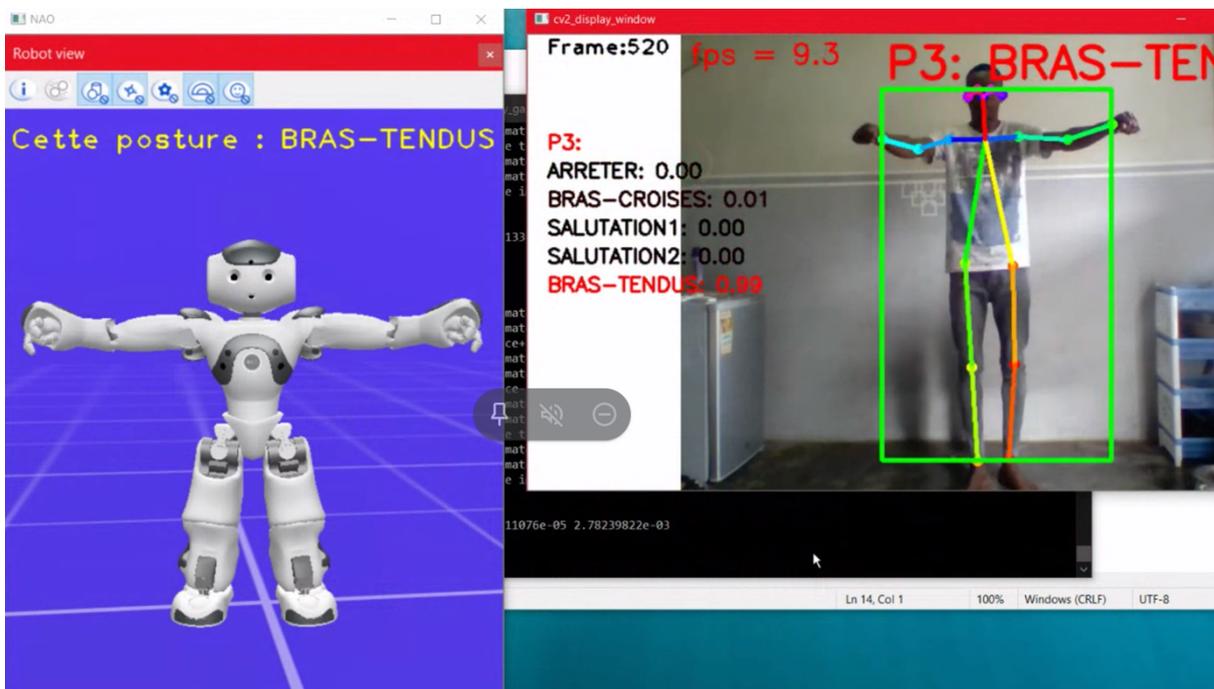


Figure 15 - Capture d'écran montrant la reconnaissance de poses

4.3.5.2 Phase expérimentale 2

Dans un second temps, le jeu d'imitation a été implémenté par un accompagnant humain, avec des sujets correspondant aux critères d'inclusion, au sein d'un environnement qui leur était familier. Les objectifs de cette expérimentation étaient d'appréhender les premières réactions des participants, vérifier s'ils s'engageaient dans le jeu, si des tentatives d'imitation étaient observées, si leurs poses étaient correctement détectées par l'algorithme. Cette seconde phase sera libellée « Phase expérimentale 2 »

Elle s'est déroulée à Abidjan (Côte d'Ivoire), au sein du Centre d'Aide Médico-Psychosocial de l'Enfant (CAMPSE), où environ 70 enfants et adolescents à besoins particuliers étaient scolarisés à Abidjan. Parmi eux, une trentaine d'enfants et adolescents présentant des troubles du spectre autistique, principalement à bas niveau de fonctionnement.

La table ci-dessous présente les caractéristiques des participants de la phase expérimentale 2 :

Identifiant du participant	Âge biologique	Âge neuro Developmental (ND)	Score CARS
F	18	9	33
G	14	4	46
H	13	5	38
I	12	1-2	47

Tableau 4 - Caractéristiques des participants (phase 2)

Lors de cette deuxième phase expérimentale, nous avons utilisé une salle déjà préparée par les éducateurs du CAMPSE, et généralement utilisée pour les activités de motricité.

Il s'agissait d'une petite salle, avec des murs peints en bleu et blanc et une fenêtre sans stores ni rideaux. Deux étagères murales hautes y accueillait des livres. Un tapis de sol était positionné dans un coin de la salle. Le matériel utile y était entreposé : balles en plastique de tailles et couleurs variées, objets en mousse et autres matériaux, etc...

Nous avons ajouté une table et une chaise pour l'« Assistant A », opérant l'ordinateur.

Ne disposant pas de trépied pour caméra, les séances ont été filmées par un éducateur

positionné dans un coin de la pièce, nommé « Assistant B ». Dans la phase expérimentale suivante, la « Caméra 1 » sera positionnée sur un trépied dans un coin de la salle.

Une autre personne, appelée « Assistant C », était chargée d'enregistrer les séances du point de vue de l'assistant C. Pour la suite, la « Caméra 2 » sera positionnée sur un trépied juste derrière le robot.

L'« Éducateur 1 » est l'éducateur en charge de patienter à l'extérieur de la pièce avec le participant, puis de l'y introduire au signal de l'opérateur technique.

En fin de séance, il ressort avec le participant.

Enfin, l'« Éducateur 2 » est l'accompagnant humain qui mène le jeu d'imitation. En début de séance, il est déjà présent dans la pièce attendant que le participant soit amené. Dans la configuration future, c'est le robot social qui assurera ce rôle. Mais l'accompagnant humain restera dans la pièce, debout à côté du robot, pour servir d'incitateur visuel.

4.3.5.3 Phase expérimentale 3

Dans la « Phase expérimentale 3 » un robot a été introduit, sur lequel a été implémenté l'algorithme du jeu d'imitation, et des séances ont été organisées avec une participante répondant aux critères d'inclusion, c'est-à-dire une adolescente autiste avec déficit intellectuel. La phase 3 s'est déroulée en Bretagne, au sein du laboratoire Experiment'HAAL (Human Ambient Assisted Living) et d'une salle de réunion, réaménagée, de l'Institut Mines-Télécom Atlantique.

Une première session expérimentale s'est déroulée sur deux jours au mois d'avril au sein du laboratoire. Elle consistait en une prise de contact avec le robot et une implémentation de la phase de salutations du jeu.

Une seconde session s'est déroulée sur trois jours au mois de juin, dans la salle de réunion réaménagée, et a vu l'implémentation du jeu d'imitation entier.

À titre de comparaison avec la Participante J, deux séances ont également eu lieu avec un autiste Asperger (Participant K).

La table suivante présente les caractéristiques de la participante principale et du participant secondaire :

Identifiant du participant	Âge biologique	Âge neuro-développemental (ND)	Score autisme
J	17	4	CARS : 42
K	11	14	TBC

Tableau 5 - Caractéristiques des participants (phase 3)

Pour la seconde session de la troisième phase expérimentale, nous disposions en fait de deux pièces accolées : la salle de réunion et une antichambre servant habituellement d'espace de stockage pour du matériel informatique.

La salle principale a été préalablement réaménagée. La majorité des tables et chaises ont été retirées. Une table a été conservée pour accueillir le robot.

Les posters scientifiques ont été retirés afin de ne pas constituer des sources de distraction.

Le tableau blanc a été effacé.

Les câbles électriques et de téléphonie ont été cachés sous les dalles au sol.

Une caméra sur trépied a été installée dans un coin de la pièce, de manière à filmer toutes les sessions d'un point de vue extérieur. Cette caméra est libellée « caméra 1 ». Son trépied est masqué par un panneau en bois, ne laissant dépasser que l'objectif de la caméra.

De plus, une deuxième caméra a été positionnée derrière le robot pour filmer les scènes du point de vue du robot. Cette caméra est libellée « caméra 2 ».

L'antichambre a été scindée en deux parties par des panneaux de bois.

Une première partie, agrémentée de chaises, a servi de salle d'attente pour les participants.

L'autre partie, maintenue dans l'obscurité, était utilisée par l'opérateur technique contrôlant le lancement et l'arrêt du jeu d'imitation et des enregistrements vidéo. Il était accompagné d'un observateur avisé chargé de prendre des notes sur l'expérimentation.

Depuis sa place, l'opérateur technique et l'observateur avaient vue sur la salle principale au travers d'un miroir sans tain.

À l'inverse, puisque la lumière de l'espace opérateur était éteinte et le miroir couvert par deux grands posters vierges, ils ne pouvaient être vus par les participants.

Ce point est important car si le participant avait pu voir l'opérateur technique et l'observateur au travers de la vitre, cela aurait constitué une source de distraction considérable.

La figure ci-dessous offre une représentation de l'espace d'expérimentation :

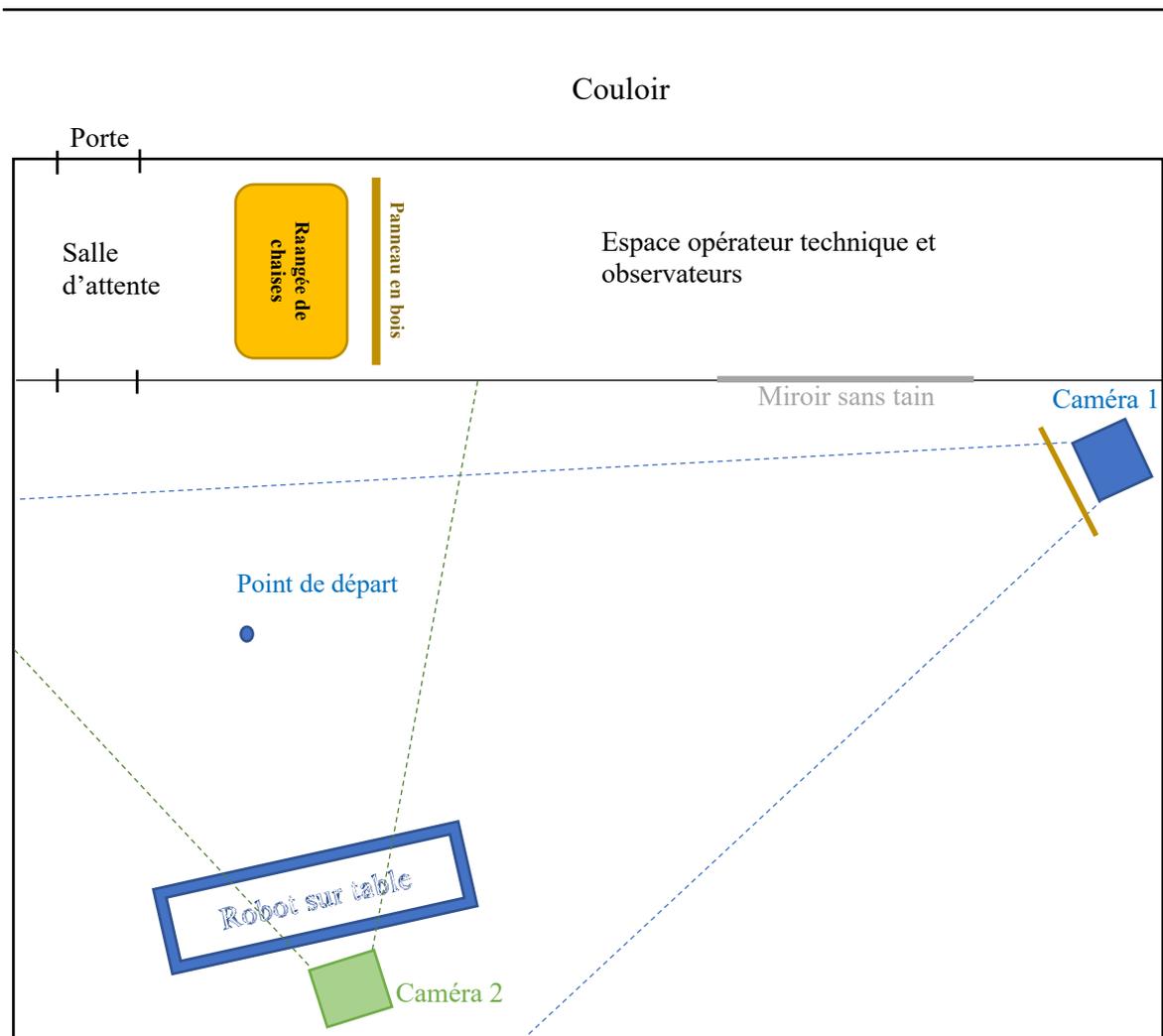


Figure 16 - Configuration de l'espace d'expérimentation (phase 3)

Dans la phase expérimentale 3, les éducatrices 1 et 2 interviennent toujours et jouent les rôles suivants :

- L'éducatrice 1 est celle qui patiente avec la participante à l'extérieur de la salle, puis rentre avec elle et l'emmène jusqu'au « point de départ ». Pendant la séance, son rôle peut varier, comme décrit dans la section « Détails et variantes du scénario de jeu ».

- L'éducatrice 2 est déjà dans la salle en début de séance, positionnée à côté du robot, et joue le rôle d'incitatrice visuelle.

Le « point de départ » mentionné ci-dessus et représenté sur la figure précédente, doit correspondre aux critères suivants :

- Inclus dans l'espace d'intersection des champs des deux caméras
- Situé sur la ligne virtuelle reliant le centre de la porte et le centre de gravité du robot
- Assez proche du robot pour permettre une interaction
- Pas trop proche du robot pour ne pas forcer la participante, et lui laisser la latitude de s'approcher d'elle-même du robot

De fait, on considérera un point à peu près à mi-chemin entre la porte de la salle et le robot social.

Le « début de séance » effectif est donc l'instant auquel la participante atteint pour la première fois le point de départ.

La « fin de séance » doit aussi être identifiée de manière à déterminer quand les différents paramètres devront arrêter d'être mesurés.

Suite aux entretiens semi-dirigés avec des professionnels de l'autisme, il avait été retenu que, lorsqu'un de nos sujets serait sollicité (pour saluer, imiter ou dire au revoir), il serait raisonnable de lui accorder au moins quinze secondes afin de lui permettre de réagir.

Nous fixons donc la fin de séance à quinze secondes après le geste d'au revoir du robot, lors de la phase de clôture du jeu d'imitation.

Les configurations expérimentales, le scénario de jeu et ses variantes, ainsi que la réflexion ayant abouti au choix du robot, sont détaillés plus bas.

La phase suivante consisterait à tenir ces séances avec au moins une dizaine de participants, sur une période de plusieurs mois. Les contraintes liées à la COVID ont impliqué de reporter cette expérimentation de longue durée.

4.3.6 Description synthétique de la structure du jeu d'imitation

Le scénario original de jeu a été progressivement élaboré, au fur et à mesure d'échanges approfondis avec des professionnels de l'autisme et des parents d'adolescents autistes.

Le jeu d'imitation que nous avons construit, est constitué de quatre phases :

- Une phase de salutations
- Une phase dite de « pairing »
- Une phase d'imitation
- Une phase de clôture

La phase de salutations doit être un accueil chaleureux du participant. Son contenu varie selon que ce dernier est verbal ou non. Dans tous les cas, l'expérimentateur humain ou le robot commence par prononcer une phrase de salutations et se présenter au participant.

Si celui-ci est verbal, on peut ensuite lui demander son prénom et conserver sa réponse dans une variable.

La phase de « pairing » a été fortement recommandée afin de faciliter l'interaction avec le participant autiste. Il s'agit d'un processus dynamique qui vise l'établissement d'une relation de confiance avec le sujet. Le principe est d'associer deux stimuli, dont l'un est neutre et l'autre a une valeur émotionnelle pour le sujet, de manière à ajuster la perception qu'a celui-ci, d'un des stimuli.

Pour exemple, si un enfant autiste est amené à rencontrer pour la première fois un nouvel éducateur, auquel il ne porte initialement aucun intérêt, cet éducateur devra s'engager dans un processus de « pairing » qui pourrait consister en l'utilisation de renforçateurs afin que l'enfant l'associe progressivement à l'agréable. L'idée est que l'enfant soit contraint de passer par la personne afin d'accéder à ce qui lui ferait plaisir. Au fil des répétitions, il commencera à aller naturellement vers la personne. C'est alors que l'éducateur sera en mesure de lui transmettre des compétences.

La phase d'imitation pourrait être subdivisée en trois sous-phases ciblant respectivement :

- L'imitation induite
- L'imitation spontanée
- La reconnaissance d'être imité(e)

Elle peut également comprendre des séquences avec objets et d'autres sans objets, en fonction du participant.

La phase de clôture consiste à dire au revoir au sujet, après l'avoir remercié pour sa participation au jeu. Il doit garder un sentiment agréable afin d'aborder la séance suivante dans un bon état d'esprit.

4.3.6.1 Scénario de jeu lors de la phase expérimentale 2 (jeu mené par l'accompagnant humain)

Phase de salutations

En début de séance, sont présents dans la salle :

- l'accompagnant humain qui fournira les gestes consignés (Assistant C)
- l'opérateur de l'ordinateur sur lequel l'algorithme de détection de poses sera lancé

Le participant est ensuite amené par son éducatrice, qui restera dans la salle et contribuera à l'engagement du participant, comme incitateur visuel ou physique.

Sur entrée du participant, l'accompagnant humain l'accueille avec un sourire, se présente à lui puis, s'il est verbal, lui demande son prénom. Ensuite, l'accompagnant tend la main au participant pour le saluer, et patiente pendant 30 secondes.

Évaluation de la phase de salutations

Succès (3) : le participant s'approche et tend la main à l'accompagnant pour répondre à sa salutation

Intermédiaire (2) : le participant ne tend pas la main à l'accompagnant pour répondre à sa salutation mais manifeste des signes d'intérêt, tels une orientation de la tête vers l'accompagnant, ou un sourire.

Échec (1) : le participant ne démontre aucun intérêt vis-à-vis de l'accompagnant.

Phase de pairing

L'accompagnant sourit, dit au participant à quel point il est heureux d'être et de jouer avec lui, puis l'invite à faire un peu de sport ensemble et patiente pendant 30 secondes, en attente d'une réaction.

Évaluation de la phase de pairing

Succès (3) : le participant se rapproche de l'accompagnant humain et/ou montre des signes d'appréciation, de joie.

Intermédiaire (2) : le participant regarde l'accompagnant humain sans les manifestations décrites en (3).

Échec (1) : le participant ne montre aucun intérêt pour l'accompagnant humain.

Phase d'imitation

L'accompagnant propose au participant d'exécuter certains mouvements sportifs :

- lever les bras vers le ciel pour s'étirer
- étendre les bras de part et d'autre du corps, puis se pencher en avant.

Ces mouvements sont initialement proposés sans objets puis, si nécessaire pour accroître l'engagement, en tenant de petites balles colorées dans les mains.

L'imitation spontanée est d'abord recherchée, puis l'imitation induite.

Évaluation de la phase d'imitation

Succès (3a) : le participant tente d'imiter l'accompagnant et le geste est ressemblant (l'algorithme de reconnaissance de gestes détecte que l'imitation est réussie).

Intermédiaire (2a) : le participant tente d'imiter l'accompagnant et le geste n'est pas ressemblant (l'algorithme de reconnaissance de gestes ne détecte pas que l'imitation est réussie).

Échec (1a) : le participant ne tente pas d'imiter l'accompagnant.

En cas d'échec, l'accompagnant commence à imiter le participant, ceci en vue de créer une interaction sociale fondée sur la reconnaissance d'être imité.

Succès (3b) : le participant réagit positivement au fait d'être imité (sourire, rire, variation de ses mouvements afin d'encourager l'imitation)

Intermédiaire (2b) : le participant n'exprime pas de réaction positive explicite à son imitation, mais montre cependant une attention accrue vis-à-vis de l'accompagnant.

Échec (1b) : le participant ne montre aucune marque d'intérêt.

Phase de clôture

L'accompagnant remercie le participant avec un sourire et l'accompagne vers son éducatrice.

Ci-après un diagramme représentant les différentes phases du jeu :

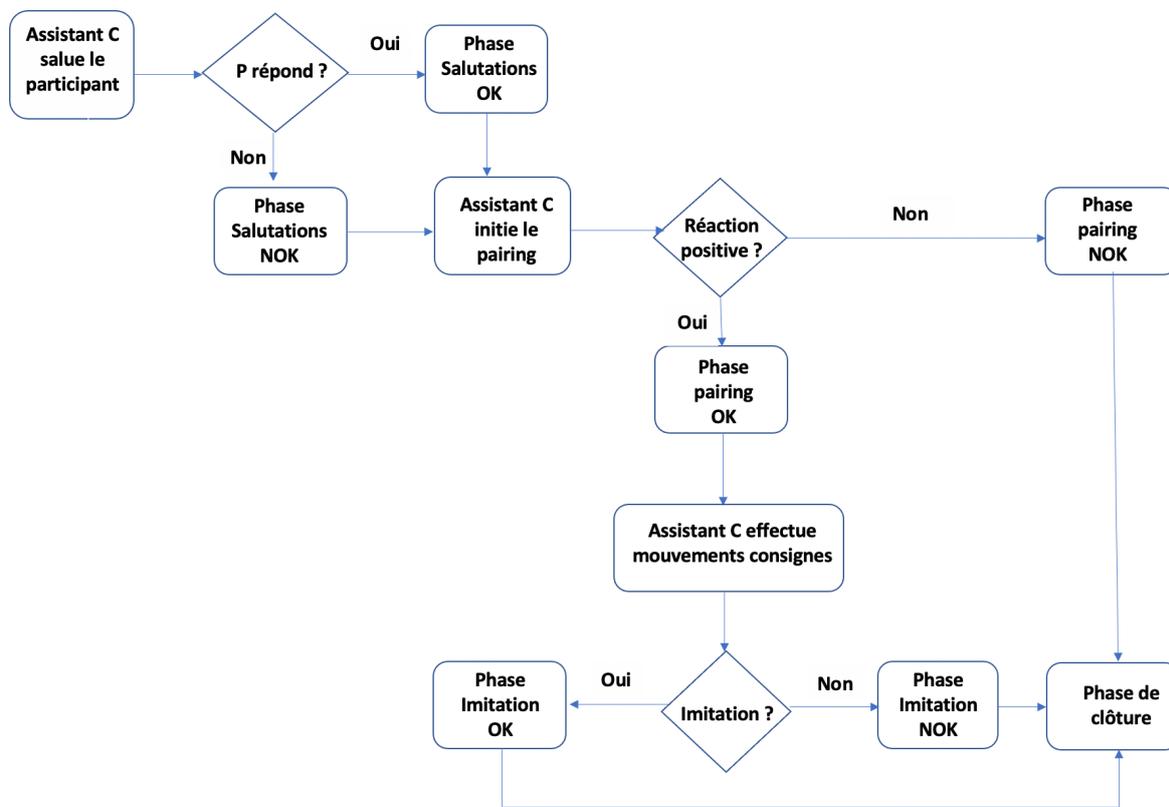


Figure 17 - Diagramme de flux du jeu d'imitation

4.3.6.2 Scénario de jeu lors de la phase expérimentale 3 (jeu mené par le robot)

En début de séance, sont présents dans la salle :

- le robot, chargé d'accueillir la participante et de mener le jeu d'imitation
- l'accompagnant humain, positionné à côté du robot, et qui joue le rôle d'incitateur visuel (éducatrice 2 ou E2)

À l'extérieur de la salle, la participante patiente dans une petite salle d'attente aménagée, en compagnie de l'éducatrice 1 (E1).

L'algorithme du jeu d'imitation est toujours organisé en quatre phases.

Cependant, certaines différences existent entre les scénarii de jeu des sessions expérimentales 2 et 3. Elles sont décrites ci-dessous.

La participante étant unique et non verbale, son prénom ne lui est pas demandé par le robot mais est directement inclus dans la salutation initiale : « Bonjour Flora »

Le robot ne tend pas la main à la participante mais effectue un geste de salutation distante (waving).

Dans la phase de pairing, une chanson est jouée par le robot afin d'engager la participante dans l'activité. Au départ, il s'agit d'une chanson standard pré-enregistrée dans le robot : « Three little bunnies »

Les gestes à imiter ne sont pas les mouvements sportifs de la session expérimentale 2, mais des gestes plus simples et fonctionnels : gestes de salutation et d'au revoir.

Par ailleurs, plusieurs variations de configurations sont proposées afin de déterminer l'impact de certains paramètres sur l'engagement de la participante et sa tendance à imiter les mouvements consigne proposés par le robot.

Configuration 1 (ex : 2106-1)

La participante pénètre dans la salle avec E1. La porte est laissée ouverte.

E1 accompagne la participante pour qu'elle se positionne en face du robot.

E2, incitatrice visuelle, se tient debout à gauche du robot.

E1 tente de quitter la pièce. Selon la réaction de la participante, E1 part effectivement ou reste dans la pièce pour jouer le rôle d'incitatrice physique.

Le jeu d'imitation est lancé via le robot.

Configuration 2 (ex 2106-2, 2106-5)

Similaire à la configuration 1, à l'exception de la porte de la salle qui est refermée une fois que la participante est entrée.

Justification :

Certaines personnes autistes réagissent de manière obsessionnelle à des éléments qui paraîtraient anodins à des personnes sans troubles du spectre autistique.

Dans son article (ref) Kanner fait référence à un enfant autiste qui ne tolérait pas de voir une porte ouverte, et allait systématiquement la refermer, jusqu'à perdre totalement patience en cas de frustration prolongée, et réagir violemment.

Pour d'autres personnes autistes, à l'inverse, ce type de comportement est suscité par une porte fermée.

Dans notre cas de figure, nous avons choisi de tester les deux configurations, espérant que la configuration « porte fermée » serait bien acceptée par le participant car elle permet de limiter les sources de distraction.

Configuration 3 (ex : 2106-4)

Similaire à la configuration 2, sauf que E2 est positionnée de l'autre côté du robot, à droite.

Justification : ce changement a simplement été opéré afin de déterminer si, en pénétrant dans la pièce, il apparaissait plus naturel pour la participante de porter le regard sur une personne positionnée à gauche ou à droite du robot.

Configuration 4 (ex : 2206-1)

Le code du jeu est légèrement modifié afin d'inclure plus d'occurrences du nom de la participante dans les phrases du robot.

Au départ, le nom n'était mentionné que dans la salutation initiale.

Justification :

L'usage du nom spécifique de la participante l'interpelle et accroît son attention.

Configuration 5 (ex : 2206-2)

Dans le code du jeu, la chanson standard est remplacée par une chanson spéciale particulièrement appréciée de la participante.

Justification : faire appel à une chanson qui enthousiasme naturellement la participante permet d'accroître son engagement dans l'activité avec le robot.

Configuration 6 (ex : 2206-3)

Similaire à la configuration 5, mis à part qu'E1 se positionne de l'autre côté du robot par rapport à E2, et joue le rôle de seconde incitatrice visuelle, au lieu d'être une incitatrice physique.

Justification :

Évaluer l'impact d'avoir deux incitatrices visuelles, plutôt qu'une incitatrice visuelle et une incitatrice physique, sur le comportement de la participant en termes d'évolution de la distance et de l'orientation vis-à-vis du robot.

Configuration 10 (ex : 2306-4)

E2 n'est pas présente dans la salle.

La participante pénètre dans la salle avec E1, qui la positionne devant le robot puis ressort rapidement, en fermant la porte derrière elle.

La participante reste donc seule avec le robot.

Après deux minutes, en fonction de la réaction de la participante, E1 revient ou non dans la salle comme incitatrice physique.

Note : entre les configurations 6 et 10, des changements mineurs avaient été opérés.

Nous avons décidé de ne pas les décrire dans ce document car aucun impact notable n'en a résulté.

Nous conservons cependant le numéro 10 pour la dernière configuration décrite, de manière à maintenir une cohérence entre les différents documents rédigés.

Pour la phase de clôture, le robot s'exclame « Merci d'avoir joué un peu avec moi. À bientôt ! » puis sourit et effectue un geste d'au revoir de la main. Il reprend ensuite sa position de repos.

4.3.7 Justification du choix du robot

4.3.7.1 *Contexte de l'usage d'un robot social*

De nombreux robots sociaux sont utilisés dans le cadre de l'accompagnement de différentes catégories de personnes, par exemple :

- Les personnes âgées dans le cadre des programmes d'aide au maintien à domicile
- Les adultes handicapés moteur
- Les adultes ou enfants autistes

Le choix d'un robot selon le contexte, peut dépendre de critères variés, parmi lesquels :

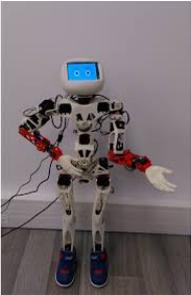
- Son apparence globale : humanoïde, androïde, inspiré d'un animal ou d'un personnage de dessin animé
- Son nombre de degrés de liberté
- La présence ou non d'un écran au niveau de son visage ou de son torse
- Son niveau d'expressivité
- Sa taille
- Son poids
- Sa capacité ou non à se mouvoir dans l'espace
- Sa capacité de préhension d'objets
- Et bien entendu, son tarif

Dans notre cas de figure, ses différents critères ont été analysés lors de discussions avec des professionnels de l'autisme, de la psychologie sociale, ainsi que les membres de l'équipe encadrante.

4.3.7.2 Analyse comparative de robots

Une analyse comparative de différents types de robots a été effectuée et un extrait du tableau de synthèse est présenté ci-dessous :

Nom robot	Picture	Type	Mobile dans l'espace	Nombre degré de libertés	Présence d'un écran
Nao		Humanoïde	Oui	25	No
Pepper		Humanoïde	Oui	20	Yes
Kaspar		Humanoïde	Non	14	No
Milo		Humanoïde	Oui	18	No

<p>QTrobot</p>		<p>Humanoïde</p>	<p>Non</p>	<p>12</p>	<p>Yes</p>
<p>Poppy</p>		<p>Humanoïde</p>	<p>Non</p>	<p>25</p>	<p>Yes</p>
<p>Troy</p>		<p>Humanoïde</p>	<p>Non</p>	<p>2</p>	<p>Yes</p>
<p>PABI</p>		<p>Animal</p>	<p>Non</p>	<p>12</p>	<p>No</p>
<p>PLEO</p>		<p>Animal</p>	<p>Oui</p>	<p>14</p>	<p>No</p>

HOAP-3		Humanoïde	Oui	28	No
--------	-----------------------------------------------------------------------------------	-----------	-----	----	----

Tableau 6 - Tableau comparatif de robots sociaux

Au vu de la population cible considérée dans le cadre de nos travaux et du jeu d'imitation à mener, les critères suivants ont été considérés prioritaires :

- Nombre de degrés de liberté suffisants au niveau des bras et de la tête
- Niveau d'expressivité
- Taille
- Capacité de préhension d'objets

Dans le cadre de ces travaux, le coût du robot sera également un élément déterminant.

4.3.7.3 Justification des critères prioritaires de choix

4.3.7.3.1 Degrés de liberté

Notre approche étant fondée sur la pratique ludique de l'imitation gestuelle, le robot sélectionné devait pouvoir a minima :

- Lever et baisser les bras latéralement et devant lui
- Plier les coudes

Pour permettre une interaction sociale améliorée, en sus de pouvoir parler, il était utile que le robot soit en mesure de hocher (haut-bas) ou secouer (gauche-droite) la tête.

Le nombre minimal de degrés de liberté recherché avait été fixé à 7.

4.3.7.3.2 Niveau d'expressivité

De nombreuses personnes autistes ont des difficultés à discerner certaines émotions, comprendre certaines expressions faciales sur des visages humains, qui leur apparaissent complexes, trop riches en information.

Certains robots ne présentant pas d'expressions faciales, tels Nao, ont eu du succès avec des enfants autistes.

Dans le cadre de la prise en charge d'adolescents autistes, le souhait est de les aider, de manière ludique et fluide, à s'habituer à discerner certaines émotions.

D'où une préférence pour un robot capable d'expressions faciales simplifiées (exemple : QTrobot), en comparaison avec des robots dénués d'expressivité.

4.3.7.3.3 Taille

Le robot Nao s'est montré efficace dans le cadre de l'amélioration des interactions sociales avec des enfants autistes [Lytridis, 2018]. Il mesure 58 centimètres.

Dans le cadre de sessions robotiques avec des adolescents, les professionnels de l'autisme avec qui nous avons travaillé, ont recommandé si possible, d'opter pour un robot de taille supérieure et répondant aux autres critères clés.

4.3.7.3.4 Capacité de préhension d'objets

L'importance relative de ce critère est due au fait que l'imitation avec objets est plus facile à susciter qu'une imitation sans objets [Nadel, 2005].

Après analyse globale, prenant également en compte les tarifs des différentes options de robots répondant aux critères listés, le choix s'est porté sur le QTrobot de la société LuxAI.

Ce sont notamment les critères de coût et d'expressivité faciale qui auront permis de trancher en faveur de QTrobot, par rapport à Pepper.

4.3.8 Justification du choix des paramètres mesurés et des critères d'évaluation

4.3.8.1 Différentes méthodes d'évaluation

Lorsqu'il s'agit d'évaluer le niveau d'une interaction sociale, il est aisé de faire preuve de subjectivité. Cela a été le cas dans le cadre de plusieurs études passées, par exemple [Robins, 2005].

La volonté d'objectiver cette évaluation implique d'identifier certains paramètres pertinents puis de les mesurer séparément.

L'évaluation globale nécessite alors de combiner ces différentes mesures et de s'appuyer sur les avis de spécialistes de la psychologie sociale.

Dans le cas de sujets présentant des troubles du spectre autistique, l'interprétation varie et nécessite l'implication de professionnels de l'autisme.

Plusieurs échelles d'évaluation de l'interaction sociale ont été développées au fil des années : Assessment of Communication and Interaction Skills [Forsyth, 1999], Social Functioning Index [Schindler, 1999], Simulated Social Interaction Test [Penny, 1995], etc...

La plupart se sont focalisées sur des personnes ayant des affections psychiatriques.

Grand nombre de ces évaluations se fondent sur l'observation d'une personne engagée dans une interaction sociale simulée, ou sont des auto-évaluations.

Le questionnaire SCQ - Social Communication Skills Questionnaire – permet principalement d'évaluer des personnes ayant subi une blessure traumatique au cerveau [Dahlberg, 2006].

Lors d'une réunion au National Institute of Health, en 2002, au sujet de la recherche sur les personnes avec autisme, les chercheurs ont plaidé pour le développement d'outils d'évaluation qui seraient fondés sur une observation du sujet en environnement réel, plutôt que dans un cadre de simulation [Lord, 2005].

L'échelle ESI - Evaluation of Social Interaction – est un outil d'évaluation spécifiquement conçu pour les ergothérapeutes avec pour objectif d'évaluer la qualité de la performance de l'interaction sociale d'une personne, dans un contexte naturel, au cours de son engagement dans une activité donnée [Fisher, 2010]. Le thérapeute enregistre alors toute information pertinente au sujet de l'observation, incluant l'objectif initial de l'interaction sociale, les éléments portant sur l'environnement et les partenaires sociaux.

Le but initial d'une interaction sociale est l'objectif souhaité, comme identifié et exprimé par la personne concernée. Par exemple, tenir une conversation avec des amis, ou animer un atelier ludique pour des enfants, ou encore collaborer avec des collègues de travail.

[Fridin, 2014] propose une formule pour calculer le niveau d'interaction sociale. Nous l'avons détaillée dans l'état de l'art mais globalement, elle s'appuie sur le niveau de contact visuel et les types d'expression émotionnelle présents lors de l'interaction :

$$IL_s = EC_s * Sign_s * \sum_{F=1}^3 W_F F$$

Les différents outils de mesure listés permettent une évaluation globale du niveau d'interaction sociale d'une personne, dans différentes situations de vie.

Dans notre contexte, dans un premier temps, il s'agira d'estimer si des interactions sociales sont suscitées chez l'adolescent autiste au cours des séances organisées.

Par la suite, il faudrait observer, sur le long terme, les effets des séances, sur l'évolution du niveau d'interaction sociale des participants dans leur environnement naturel.

Nous prenons la décision de simplifier l'évaluation en considérant les critères en gras dans la liste suivante de critères pertinents, faisant partie ou inspirés de ceux utilisés dans des échelles existantes :

- L'approche initiale : le ou la participant(e) s'avance naturellement ou non vers le robot.
- **L'évolution de la distance entre participant(e) et robot**
- **L'orientation de la tête, comme approximation de la direction du regard, et son évolution au cours de la séance**
- **L'orientation du corps et son évolution au cours de la séance**
- Les réactions éventuelles à la voix ou aux mouvements du robot (analyse des paires d'adjacence)
- **D'éventuels signes de joie, pouvant aller d'un sourire à un mouvement de danse, en passant par des mouvements spécifiques des doigts ou des bras selon le participant, ou encore l'adoption d'une pose spécifique du corps**
- **Des tentatives d'imitation**

4.3.8.2 *L'importance de l'évolution de la distance dans l'évaluation d'une interaction sociale*

À partir du début des années 1960, l'anthropologue états-unien Edward T. Hall a étudié la perception et l'utilisation de l'espace par l'homme.

Il créera le néologisme de « proxémie » pour désigner ce domaine d'étude.

Elle peut aussi se définir comme la relation que les individus entretiennent avec la distance sous tous ses aspects (distance physique, distance perçue, représentations de ce qui est proche ou lointain).

[Hall, 1960] a identifié plusieurs facteurs impactant, dont notamment les facteurs culturels.

À la suite de nombreuses observations, Hall met en évidence quatre catégories de distances interindividuelles.

Du fait des facteurs culturels, il est important de préciser que ces observations ont été effectuées aux États-Unis.

Les valeurs limites seraient différentes en Côte d'Ivoire ou en Allemagne par exemple.

Voici les catégories définies par Hall :

La distance intime (15-45 cm) : zone qui s'accompagne d'une grande implication physique et d'un échange sensoriel élevé.

La distance personnelle (45-135 cm) : est utilisée dans les conversations particulières.

La distance sociale (1,20-3,70 m) : est utilisée au cours de l'interaction avec des amis et des collègues de travail

La distance publique (supérieure à 3,70 m) : est utilisée lorsqu'on parle à des groupes.

Ce système de classification proxémique s'appuie sur l'hypothèse ci-dessous :

« La conduite que nous nommons territorialité appartient à la nature des animaux et en particulier à l'homme. Dans ce comportement l'homme et l'animal se servent de leur sens pour différencier les distances et les espaces. La distance choisie dépend des rapports individuels, des sentiments et des activités des individus concernés. »

Il est prouvé que la distance varie selon l'image que l'on se fait de l'autre.

Si une personne préjuge du manque de sympathie, voire de la méchanceté d'une autre, elle aura tendance à se tenir plus loin d'elle que d'une personne perçue comme sympathique.

Par ailleurs, différentes expériences ont dévoilé qu'une personne non handicapée se place naturellement plus loin d'une personne atteinte de handicap que d'une personne qui en est dénuée.

Les exemples sont nombreux pour amener à comprendre que l'évolution de la distance n'est pas anodine à l'heure de l'évaluation d'une interaction sociale.

4.3.8.3 L'importance de la direction du regard et raison de l'approximation

La direction du regard a souvent été utilisée comme un critère de mesure du niveau d'une interaction sociale.

En effet, pour qu'il y ait interaction sociale entre deux individus, il faudrait qu'il y ait une forme d'attention à l'autre, et la direction du regard en est un indicateur.

Pour mesurer la direction du regard des participants, il nous aurait fallu faire usage d'un outil de « tracking » spécifique, soit des lunettes de mesure de suivi du regard, ou un système d'oculométrie via webcam.

Au vu de notre population cible, la première option était exclue car les lunettes auraient constitué un facteur de gêne et de distraction.

La deuxième option aurait techniquement pu être implémentée. Dans le cadre d'une interaction avec un robot, il est probable que les résultats auraient été plus pertinents qu'avec un interlocuteur humain. En effet, comparativement aux personnes ne présentant pas de trouble du spectre autistique, les personnes autistes maintiennent plus difficilement un contact visuel direct avec une autre personne. Beaucoup d'entre elles éprouvent des difficultés à fixer un visage humain, car elles peuvent alors se sentir submergées par la quantité de stimuli.

Cependant, elles parviennent mieux à appréhender les expressions faciales simplifiées, ou les visages statiques, de robots humanoïdes basiques.

Dans tous les cas, la mesure du suivi du regard aurait nécessité que nous introduisions une technologie supplémentaire dans le cadre de nos travaux. Afin de ne pas complexifier la méthodologie, nous avons réfléchi à une alternative.

Suite aux entretiens avec des professionnels de l'autisme, ainsi que des parents d'enfants ou adolescents autistes, nous avons décidé d'utiliser le paramètre d'orientation de la tête comme une approximation de la direction du regard. L'orientation de la tête était mesurable avec les outils déjà employés dans le cadre de nos travaux, pour la reconnaissance de poses.

4.4 Méthode de calcul du niveau d'interaction sociale

Ci-dessous la modélisation que nous proposons pour la mesure du niveau d'interaction sociale avec une population verbale, et dans un contexte où l'expression émotionnelle faciale pourrait effectivement être évaluée :

$$IS = D * O_C * O_T + \sum_{F=1}^3 W_F F$$

D représente le score normalisé d'évolution de la distance entre le participant et le robot.

O_C représente le score normalisé d'évolution de l'orientation du corps du participant par rapport au robot.

O_T représente le score normalisé d'évolution de l'orientation de la tête du participant par rapport au robot.

W_F est une variable binaire (0 ou 1) indiquant si chaque type d'expression émotionnelle est présent, à savoir faciale (niveau 1), corporelle (niveau 2) ou vocale (niveau 3).

Cependant, pour deux raisons, nous n'avons pas utilisé la formule ci-dessus telle quelle, mais l'avons adaptée. La première raison est que la population de sujets avec laquelle nous avons décidé de travailler, est non verbale. La seconde est que, lors de notre troisième phase expérimentale, l'utilisation des masques faciaux étant obligatoire du fait de la situation de pandémie, l'expression émotionnelle faciale pouvait difficilement être évaluée. Nous avons donc retiré le terme contenant W_F et introduit les variables A et B .

A est une variable binaire indiquant s'il y a eu (1) ou non (0) un signe perceptible d'appréciation de la séance (rire, gestes stéréotypés du participant exprimant la joie),

B est une variable binaire indiquant s'il y a eu (1) ou non (0) tentative d'imitation.

Nous avons donc simplifié la formule d'évaluation du niveau d'interaction sociale :

$$IS = D * O_C * O_T + A + B$$

Afin de normaliser les différentes valeurs possibles pour les paramètres d'évolution de distance, ainsi que d'orientation du corps et de la tête, nous avons établi des échelles de Likert [Joshi, 2015], à cinq (5) niveaux.

Les trois tableaux suivants présentent, pour chacun des trois paramètres, les cinq scores possibles :

Score normalisé d'évolution de distance D	Descriptif
1	À partir du point de départ, ne fait que s'éloigner du robot
2	À partir du point de départ, s'éloigne du robot globalement (c'est-à-dire malgré quelques va-et-vient)
3	Reste globalement statique
4	Effectue des va-et-vient mais globalement se rapproche du robot
5	Ne s'éloigne jamais du robot relativement à sa position initiale

Tableau 7 - Échelle de Likert pour l'évolution de distance

Score normalisé d'évolution de l'orientation du corps O_C	Descriptif
1	Passe plus de 90% du temps de séance de dos ou trois-quart arrière (TQA)
2	Passe entre 60 et 90% du temps de séance de dos ou TQA
3	Passe entre 30 et 60% du temps de séance de dos ou TQA
4	Passe entre 10 et 30% du temps de séance de dos ou TQA
5	Passe moins de 10% du temps de séance de dos ou TQA (includ : maintient son corps constamment face au robot)

Tableau 8 - Échelle de Likert pour l'évolution d'orientation du corps

Score normalisé d'évolution de l'orientation de la tête O_T	Descriptif
1	Passe plus de 90% du temps à regarder dans d'autres directions que vers le robot
2	Passe entre 60 et 90% du temps à regarder dans d'autres directions que vers le robot
3	Passe entre 30 et 60% du temps à regarder dans d'autres directions que vers le robot
4	Passe entre 10 et 30% du temps à regarder dans d'autres directions que vers le robot
5	Passe moins de 10% du temps à regarder dans d'autres directions que vers le robot (includ : regarde constamment le robot)

Tableau 9 - Échelle de Likert pour l'évolution d'orientation de la tête

4.5 Conclusion du chapitre 3

Dans ce troisième chapitre de manuscrit, nous avons présenté notre problématique, nos hypothèses ainsi que la méthodologie de travail.

Trois aspects principaux sont considérés : la pratique de l'imitation, la reconnaissance de gestes et la génération d'interactions sociales.

Nous avons proposé une méthodologie de recherche s'appuyant sur des questionnaires, des entretiens semi-dirigés, des sessions expérimentales d'un jeu d'imitation avec des participants correspondant à nos critères d'inclusion : des préadolescents et adolescents présentant des troubles du spectre autistique et un déficit intellectuel.

Des considérations relatives aux jeux de données ont été présentées.

Le scénario du jeu ainsi que les différentes configurations de séance ont été décrites.

De plus, la justification du choix du robot et des paramètres de mesure a été détaillée.

Enfin, nous avons présenté des méthodes d'évaluation du niveau d'interaction sociale.

CHAPITRE 4 :
SIRIA, UN SYSTEME SOCIAL,
INFORMATIQUE ET ROBOTIQUE VISANT
À SUSCITER DES INTERACTIONS AVEC
DES PERSONNES AUTISTES

5 CHAPITRE 4 – SIRIA, UN SYSTEME SOCIAL, INFORMATIQUE ET ROBOTIQUE VISANT À SUSCITER DES INTERACTIONS AVEC DES PERSONNES AUTISTES

5.1 Introduction

Dans le présent chapitre, nous présenterons le système que nous avons conceptualisé : SIRIA. Il s'agira de lister et décrire les différents éléments constitutifs de ce système socio-technique. Nous offrirons également une vue d'ensemble du système, au travers du schéma de la salle d'expérimentation.

Ensuite, nous détaillerons comment notre système évalue le niveau d'interaction sociale d'un participant pour une séance donnée, en fonction des paramètres qu'il aura mesurés.

5.2 Description générale du système proposé

On appelle SIRIA le système mis en place dans le cadre de nos travaux, qui s'inscrivent dans le domaine de l'interaction humain-robot. Les lettres de l'acronyme signifient « Système Social, Informatique et Robotique visant à susciter des Interactions avec des personnes Autistes ».

Le système global proposé assure les fonctions suivantes :

1. Détection de la présence d'un participant
2. Adresse de salutations au participant
3. Détection des réactions du participant
4. Si ce dernier est verbal, requête de son nom et identification de la réponse
5. Implémentation de la phase de pairing
6. Démonstration de gestes consigne
7. Incitation visuelle du participant
8. Éventuelle incitation physique du participant
9. Détection des gestes du participant
10. Reconnaissance des tentatives d'imitation
11. Dans une seconde phase, imitation de certains gestes du participant
12. Mesure, à intervalles réguliers, de la distance entre le participant et le robot

13. Mesure, à intervalles réguliers, de l'orientation du corps du participant par rapport au robot
14. Mesure, à intervalles réguliers, de l'orientation de la tête du participant par rapport au robot
15. Détermination des valeurs des paramètres d'évolution de la distance, de l'orientation du corps et de la tête du participant
16. Calcul du niveau de l'interaction sociale avec le participant pour chaque séance.
17. Implémentation de la phase de clôture

La version actuelle de SIRIA est constituée de deux parties, l'une visible par le sujet autiste, l'autre non.

La partie visible est constituée de :

- la partie matérielle du robot social
- deux accompagnants humains
- la caméra 2.

Idéalement, les deux caméras ne devraient pas être visibles du participant.

Dans notre cas, la caméra 1 est positionnée sur un trépied, dans un coin de la pièce, le plus proche du miroir sans tain. Un panneau en bois est placé devant le trépied, et sa hauteur est ajustée de manière que l'objectif de la caméra dépasse à peine le panneau. La caméra 1 peut donc être considérée comme appartenant à la partie non visible du système.

Cependant la caméra 2 est positionnée sur un trépied derrière le robot. Elle est donc visible du participant.

La partie non visible par le participant comprend :

- l'opérateur technique
- l'observateur
- l'ordinateur utilisé par l'opérateur
- la partie logicielle du robot social
- la caméra 1.

Le système décrit ici est celui utilisé lors des phases expérimentales. Une fois le prototype testé et validé, il pourra être ajusté afin de permettre une utilisation facile à domicile. On veillera à ce que les modifications apportées au système, se fassent toujours en lien avec les accompagnants de personnes autistes, parents et professionnels.

5.3 Description détaillée de la partie visible de SIRIA

La partie visible du système proposé est illustrée ci-dessous :

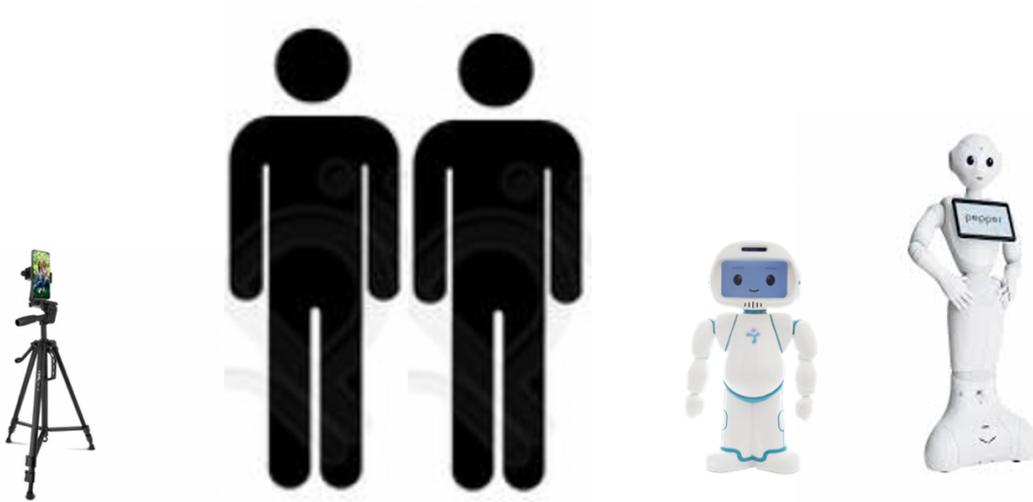


Figure 18 - Éléments visibles de SIRIA (phase expérimentale 3)

Note : idéalement, la caméra sur trépied ne devrait pas être visible du participant, car elle constitue une potentielle source de distraction.

Le robot social

Dans le cadre des présents travaux, le principal robot social utilisé a été le QRobot de l'entreprise luxembourgeoise LuxAI.

Pour certaines séances complémentaires, le robot Pepper de la société Softbank Robotics a été introduit.

Les éléments justificatifs du choix des robots ont été présentés dans la section Méthodologie du présent document.

Ci-dessous les descriptifs de ces deux robots.

QTrobot, appelé QT

Il s'agit d'un robot humanoïde, créé en 2015, avec un écran au niveau du visage. Cela permet d'afficher différentes expressions faciales correspondant à des émotions : content, fâché, surpris, triste, surpris, effrayé.

QT mesure 64 cm et pèse 5 kg.

Il dispose de 14 degrés de liberté pour lui permettre d'effectuer de nombreux gestes avec la partie supérieure de son corps. Les degrés de liberté des mains et des poignets sont configurés de façon manuelle. À l'inverse, les degrés de liberté de la tête, ainsi que ceux des bras et des épaules, sont motorisés.

QT dispose de quatre microphones de haute performance, et sur son front se trouve une caméra 3D Intel® RealSense™.

Nativement, QTrobot renferme un processeur Intel NUC, Intel® Core™ i5/i7, le système d'exploitation Linux Ubuntu 16.04 Lts, ainsi qu'une interface ROS. La communication avec QT se fait via câble Ethernet ou réseau sans fil Wi-Fi.

Pepper

Il s'agit d'un robot humanoïde mobile, créé en 2014 et doté d'une intelligence artificielle. Il a été conçu pour interagir nativement avec l'humain. Il peut tenir une conversation simple et exécuter des consignes basiques.

Il dispose de quatre microphones.

Pepper mesure 120 cm et pèse 28 kg. Heureusement, ses trois roues permettent de le déplacer facilement, de manière omnidirectionnelle. Il peut atteindre une vitesse de 5 km/h et dispose de plusieurs capteurs de mouvement pour des raisons de sécurité. Ceux-ci lui permettent d'éviter des collisions avec des sujets ou des éléments de l'environnement.

Pepper a 20 degrés de liberté, 17 articulations en plus de ses trois roues.

Comme QT, il dispose d'un écran, mais tactile et situé au niveau du torse. Sa caméra 3D est localisée derrière ses yeux. Pepper a deux autres caméras discrètes, au niveau de la bouche et du front, ainsi que cinq capteurs tactiles : un sur chaque main et trois au niveau de la tête.

Son système d'exploitation est le système propriétaire NAOqi.

La communication avec Pepper se fait via câble Ethernet ou réseau Wi-Fi.

Les accompagnants humains

Dans le cadre de nos travaux, comme décrit dans le chapitre abordant la méthodologie, plusieurs phases expérimentales ont eu lieu, et plusieurs configurations de séances ont été implémentées.

Dans celle qui correspond à notre configuration cible, deux éducatrices participent :

- E1 patiente à l'extérieur de la salle avec la participante puis l'accompagne pour qu'elle se positionne au point de départ de séance. Ensuite E1 sort de la salle et, en fin de séance, revient chercher la participante pour l'emmener à l'extérieur, pour un temps de pause.
- E2, se tient debout à côté du robot et incite, sans contact physique, la participante à s'engager dans le jeu avec le robot. Il s'agit d'un rôle d'incitation visuelle.

Au cours de certaines séances, E1 a joué le rôle d'incitatrice physique et cela s'est avéré utile. En effet, la participante était distraite et ne se maintenait pas face au robot. L'incitation physique permettait alors de recentrer l'attention sur le robot.

Cependant, la cible serait que la participante s'engage dans les activités sans nécessiter l'intervention d'un incitateur physique.

Lors de la première session de la phase expérimentale 3, au mois d'avril, uniquement la phase de salutations a été implémentée. Une seule personne a alors joué le rôle de E1 et de E2. Il s'agissait de la cousine de la participante, âgée de 22 ans, qui avait été initiée aux objectifs des travaux ainsi qu'à la structure du jeu d'imitation.

Lors de la suite de la phase expérimentale 3, au mois de juin, les personnes ayant assuré les rôles de E1 et E2 étaient respectivement une éducatrice et l'éducatrice référente de la participante, au sein de son IME.

Pour rappel, les IME sont des établissements médico-éducatifs qui accueillent généralement les enfants et adolescents atteints de handicap mental, présentant une déficience intellectuelle liée à des troubles neuropsychiatriques.

La caméra 2

Il s'agit d'une caméra de smartphone montée sur un trépied positionné juste derrière le robot. Son objectif est aligné sur le milieu du visage du robot, afin que les mesures d'orientation du participant par rapport à la caméra correspondent aux mesures d'orientation par rapport au robot.

Il avait été envisagé d'utiliser la caméra du robot pour filmer la scène de son point de vue, et permettre d'effectuer les mesures de distance et d'orientation. Cependant, puisque la tête du robot est mobile, cela n'aurait pas convenu.

5.4 Description détaillée de la partie non visible

La partie non visible de SIRIA, du point de vue du participant, comprend :

- l'opérateur technique
- l'observateur
- l'ordinateur utilisé par l'opérateur
- la partie logicielle du robot social
- la caméra 1.

L'opérateur technique et l'observateur

L'opérateur technique et l'observateur sont assis dans la deuxième partie de l'antichambre, celle qui est maintenue dans la pénombre, afin de ne pas être visibles depuis la salle d'expérimentation.

L'expérimentateur principal assure le rôle d'opérateur technique ou le confie à un assistant de recherche. L'opérateur technique a la charge de :

- lancer l'enregistrement des séances au niveau des caméras
- lancer le jeu d'imitation
- l'interrompre si besoin
- lancer le(s) programme(s) permettant la mesure des paramètres identifiés
- sauvegarder les enregistrements vidéo, en les nommant de manière explicite, pour une exploitation simplifiée

Le rôle d'observateur est tenu par une personne connaissant le participant ou par un assistant de recherche neutre. L'observateur a la charge de :

- S'imprégner de la structure de la fiche de séance au préalable
- Regarder le déroulement de la séance, avec une grande attention, du début à la fin
- Évaluer les paramètres pertinents, en utilisant les échelles fournies, comme décrit dans la section méthodologie
- Noter ses observations au sujet de chaque séance, dans l'encadré de la fiche réservé à cet effet.

L'ordinateur de l'opérateur

Dans la mise en œuvre de SIRIA, différents types de matériel, de langages de programmation et d'algorithmes peuvent être utilisés. Nous indiquons quelques caractéristiques fondamentales à prendre en compte et justifions nos choix.

L'ordinateur est utilisé par l'opérateur technique pour se connecter à distance au robot ainsi qu'aux caméras.

Il devrait disposer d'un espace de stockage et d'une mémoire vive considérables. En effet, il ne faudrait pas que le lancement ou l'interruption des programmes soient retardés par une mémoire vive insuffisante. Dans notre cas, l'ordinateur de l'opérateur disposait d'une mémoire vive de 8 gigaoctets. Nous recommandons une valeur minimale de 4 gigaoctets.

L'espace de stockage devrait être assez important pour stocker l'ensemble des programmes et logiciels utiles mais surtout, les enregistrements vidéo des différentes séances. Notre ordinateur était doté d'un espace de stockage de 80 gigaoctets. Ceci est la valeur minimale que nous recommandons.

Il est souhaitable que l'ordinateur renferme un processeur assez puissant, multi-coeurs, et contienne une GPU – Graphics Processing Unit – afin de permettre un traitement efficace des images et vidéos.

La partie logicielle du robot social

Sur le QTrobot, nous avons installé un environnement Python 3, avec toutes les dépendances nécessaires, et créé une architecture ROS (Robot Operating System).

Justifions le choix de Python.

Deux langages de programmation peuvent être utilisés avec ROS : C++ et Python.

C++, créé en 1983 par un informaticien danois, est une évolution du langage de programmation C, créé en 1970 dans les laboratoires Bell aux États-Unis. C'est un langage multi-paradigmes, ce qui signifie que l'on peut utiliser différentes techniques de programmation en C++, notamment la programmation orientée objet (POO). Celle-ci propose une organisation modulaire du code, ce qui permet une réutilisation facile de certaines fonctionnalités. Le langage C++ est reconnu pour sa haute performance, mais également pour sa complexité de syntaxe.

Python, à l'inverse, est particulièrement célèbre pour la simplicité de sa syntaxe et la lisibilité du code, malgré l'absence de délimiteurs visibles d'expressions.

Ce langage aurait été créé en 1990 aux Pays-Bas. Il dispose de structures de données de haut-niveau et d'un typage dynamique. Une fois les bases acquises, l'écriture de programmes en Python est généralement plus rapide que dans la majorité des autres langages.

De nombreuses bibliothèques sont disponibles dans les deux langages de programmation, C++ et Python.

En somme, si une personne ne nécessite pas un très haut niveau de performance et n'est pas déjà experte en C++, il lui sera préférable de développer ses programmes en Python, qui est lui aussi un langage puissant.

De plus, il est possible de combiner les deux langages, en créant par exemple des extensions en C++ pour un programme écrit en Python.

Le Robot Operating System est un ensemble de bibliothèques logicielles et d'outils open source, qui permettent de développer des applications robotiques. ROS est supporté nativement par le robot QT.

C'est la distribution *noetic* qui a été installée. Elle a été publiée en mai 2020 et principalement prévue pour être installée sur un système d'exploitation Linux Ubuntu. 20.04. La version de ROS est la 1.15.7.

Pour rappel, une architecture ROS contient des nœuds.

Chaque nœud est un processus qui assure une fonction donnée.

Cette architecture modulaire permet l'isolement des dysfonctionnements, pour une résolution facilitée, ainsi que la réutilisation de fonctionnalités du code au sein d'autres programmes.

La communication entre les nœuds peut se faire de différentes façons :

- Via des *topics*
- Par des *Services*
- Via le *Parameter Server*

Nous ne détaillerons pas ici les différents modes de communication. Dans notre cas, nous utiliserons :

- Des *topics*, pour les communications asynchrones
- Des *services*, pour les communications synchrones

Nous avons commencé par créer les nœuds suivants, correspondant aux fonctionnalités de base de notre jeu d'imitation :

- Greeter
- Gesture_reco
- Distance_measurer
- Body_orient_measurer
- Head_orient_measurer
- Social_int_measurer
- Farewell

Le nœud Greeter est celui qui assure la fonction de salutations.

Il salue le participant, indique le nom du robot ainsi que son intention. Dans notre cas, « Tu sais, j'aimerais jouer avec toi ».

Pour un participant verbal, il pourrait demander le nom du participant et stocker la réponse dans une variable.

Le nœud Gesture_reco est celui qui procède à la reconnaissance des gestes du participant, sur la base des gestes appris au préalable par le robot.

Le nœud Distance_measurer va évaluer, à intervalles réguliers, la distance entre le participant et le robot. Puis calculer la valeur du paramètre d'évolution de la distance au cours de la séance.

Le nœud Body_orient_measurer va évaluer, à intervalles réguliers, l'orientation du corps du participant par rapport au robot. Puis calculer la valeur du paramètre d'évolution de l'orientation du corps au cours de la séance.

Le nœud Head_orient_measurer va évaluer, à intervalles réguliers, l'orientation de la tête du participant par rapport au robot. Puis calculer la valeur du paramètre d'évolution de l'orientation de la tête au cours de la séance.

Le nœud Social_int_measurer calcule, à partir des valeurs des trois paramètres d'évolution précédents, le niveau d'interaction sociale pour une séance donnée.

Le nœud Farewell est celui qui implémente la phase de clôture du jeu d'imitation. Il remercie le participant d'avoir joué et lui dit à bientôt.

Pour un participant verbal, il pourrait demander ce qu'il a aimé et ce qu'il n'a pas apprécié de la séance.

Pour lancer un nœud, greeter par exemple, la commande suivante est utilisée, à partir du répertoire contenant le fichier Python du nœud :

```
qtrobot@QTPC:~/catkin_ws/src/greeter/src$ python greeter.py
```

Dans le cas de Greeter, cette commande affiche alors :

```
[INFO] [1617986840.151256]: Hello, my name is QT! I would like to play with you!
```

Des packages ROS peuvent être créés, pour organiser le code.

Un package est un module qui peut être utilisé de manière indépendante car il contient tous les éléments nécessaires à son bon fonctionnement.

Par exemple, un package peut contenir plusieurs nœuds, les bibliothèques et programmes complémentaires utiles à leur fonctionnement, ainsi que des fichiers de configuration.

La création de packages facilite la réutilisation du code ROS d'un développeur à un autre, d'un environnement à un autre. En effet, une même fonctionnalité peut servir dans le cadre de diverses applications. Il est donc bon qu'elle soit programmée et « conditionnée » de manière à pouvoir être facilement réutilisable.

Cette architecture modulaire et l'existence d'une communauté active de développeurs, sont deux grands avantages du Robot Operating System.

Pour créer un package ROS appelé *imitation_pkg*, nous avons procédé ainsi :

```
qtrobot@QTPC:~/catkin_ws$ catkin_create_pkg imitation_pkg rospy
```

```
Created file imitation_pkg/package.xml
```

```
Created file imitation_pkg/CMakeLists.txt
```

```
Created folder imitation_pkg/src
```

```
Successfully created files in /home/qtrobot/catkin_ws/imitation_pkg. Please adjust the values in package.xml.
```

Le package est créé :

```
qtrobot@QTPC:~/catkin_ws$ ls
```

```
build devel imitation_pkg src
```

Le répertoire `imitation_pkg` contient un fichier `CMakeLists` ainsi que le fichier `package.xml` :

```
qtrobot@QTPC:~/catkin_ws$ ls -al imitation_pkg/
```

```
total 24
```

```
drwxrwxr-x 3 qtrobot qtrobot 4096 mai  6 13:10 .
```

```
drwxrwxr-x 6 qtrobot qtrobot 4096 mai  6 13:10 ..
```

```
-rw-rw-r-- 1 qtrobot qtrobot 7083 mai  6 13:10 CMakeLists.txt
```

```
-rw-rw-r-- 1 qtrobot qtrobot 2626 mai  6 13:10 package.xml
```

C'est dans le fichier XML qu'il faut ajuster quelques paramètres.

Dans le répertoire `src`, nous avons stocké :

- L'algorithme du jeu d'imitation développé en langage de programmation Python
- Les algorithmes complémentaires permettant de mesurer certains paramètres, notamment la distance et l'orientation.

Voici notre arborescence de fichiers schématisée :

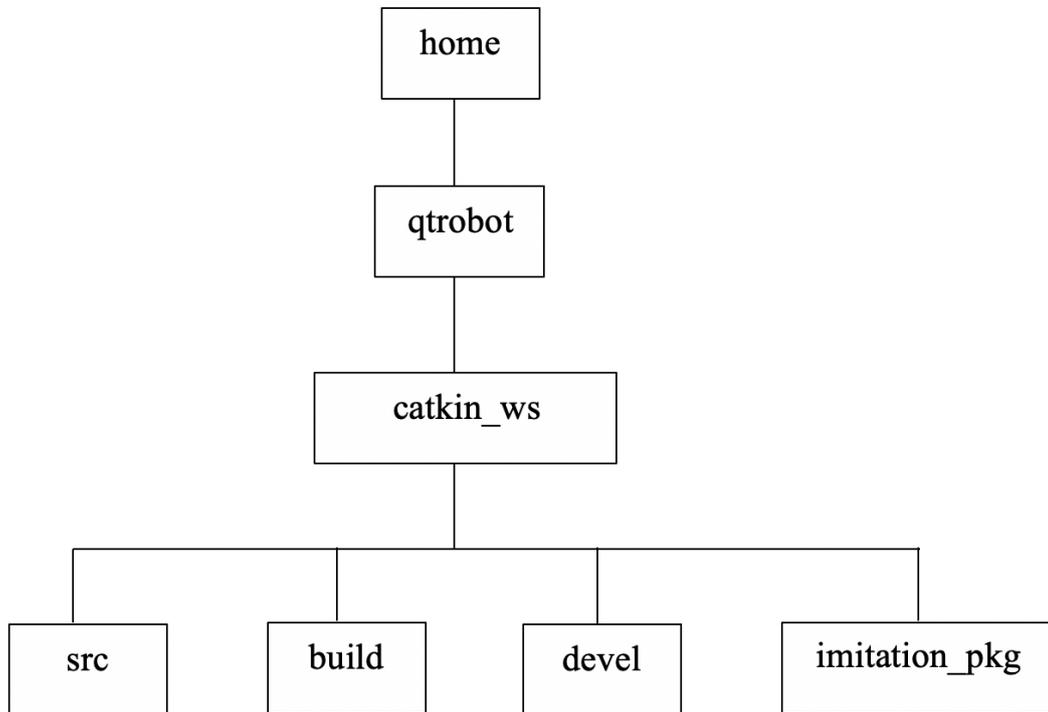


Figure 19 - Arborescence fichiers ROS

La caméra 1

Nous avons utilisé le modèle Vivotek PZ81X1, monté sur un trépied dans un coin de la pièce, afin d'avoir une vue globale sur la scène.

Il s'agit d'une caméra haute performance dotée principalement des fonctionnalités suivantes :

- zoom optique 10x
- zoom arrière permettant d'obtenir des vues panoramiques : -150° à 150°
- inclinaison : -45° à +90° (vers le haut)
- compression en temps réel, avec un triple codec (H.264, MPEG-4 and MJPEG)

5.5 Description détaillée des fonctions principales de SIRIA

Certaines fonctions de SIRIA sont assurées par le sous-système technique, et d'autres par le sous-système humain.

Les fonctions techniques sont contenues dans les programmes `imigame.py`, `distance_mesurer.py` et `orient_mesurer.py`.

5.5.1 Détail de la fonctionnalité de détection de squelette

Au début du jeu, le squelette du participant est détecté au travers de la caméra. La figure suivante en fournit une illustration schématique :

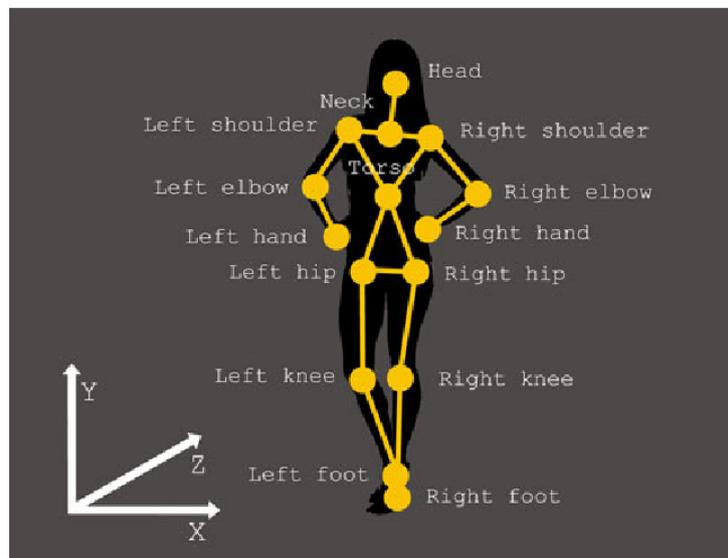


Figure 20 - Représentation des articulations du squelette détecté

Dans le cas présenté, les articulations et autres points détectés sont :

- la tête
- le cou
- les épaules, gauche et droite
- le centre du torse
- les coudes, gauche et droit
- les mains, gauche et droite
- les hanches, gauche et droite
- les genoux, gauche et droit
- les pieds, gauche et droit

Selon l'algorithme utilisé, des points additionnels peuvent être identifiés, tels des bouts de doigts, les oreilles ou les chevilles.

La fonction de détection de squelette peut être native dans un robot interactif. Mais un algorithme open source peut également être installé.

Les paramètres, tel le nombre maximal de squelettes détectables, ou le nombre de points par squelette, peuvent varier.

Lors des phases expérimentales 1 et 2 (sans robot), nous avons implémenté la fonction de détection de poses à l'aide de l'algorithme Openpose, combiné à la librairie open source Tensorflow, qui est utilisée pour développer des algorithmes de Machine learning et de Deep learning.

Tensorflow permet de résoudre des problèmes mathématiques de haute complexité en utilisant des architectures d'apprentissage expérimentales. On pourrait comparer cela à un système de programmation dans lequel les traitements (calculs) sont représentés par des graphes, où les nœuds sont des opérations mathématiques et les flèches sont des données multidimensionnelles interconnectées appelées tenseurs. L'interface de programmation d'applications de Tensorflow s'appuie sur le langage Python mais c'est le langage C++, de performance supérieure, qui est utilisé pour la bonne exécution des applications.

Tensorflow est utilisée pour entraîner et exécuter des réseaux de neurones pour la classification d'éléments. Un domaine d'application est justement la reconnaissance de poses et de gestes.

Dans le cas de QTrobot, c'est l'algorithme propriétaire Nuitrack qui sert à la détection de squelettes. Par défaut, ce programme peut en détecter jusqu'à six. Pour chaque squelette, vingt-cinq points sont identifiés théoriquement, mais uniquement vingt sont exploitables dans la version actuelle. Le premier point est un point réservé, pour un usage technique. Les points des pieds et des bouts de doigts, droit et gauche, ne sont pas détectés.

Afin d'utiliser la fonction native de détection de squelettes, il faut importer la librairie *Skeletons* dans le programme :

```

#!/usr/bin/env python
'''
  Authors: L. N. Vallée
  //CopyPolicy: Released under the terms of the LGPLv2.1 or later, see LGPL.TXT
'''

import sys
import rospy
import cv2
from std_msgs.msg import *
from qt_robot_interface.srv import *
from qt_gesture_controller.srv import *
from qt_nuitrack_app.msg import Gestures
from qt_nuitrack_app.msg import Skeletons

```

Figure 21 - Capture de l'import de la librairie Skeletons

5.5.2 Implémentation des phases de salutations, pairing et clôture

Ces différentes phases ont été présentées dans la section méthodologie. On pourra s'y référer au besoin.

Pour rappel, dans notre jeu d'imitation, la phase de pairing, a pour principe d'associer deux stimuli, dont l'un est neutre et l'autre a une valeur émotionnelle pour le sujet, de manière à ajuster la perception qu'a celui-ci, d'un des stimuli.

Naturellement, le stimulus ayant une valeur émotionnelle, dépendra du sujet. Il apparaît donc inadapté de programmer une phase de pairing unique dans un robot qui interagira avec divers participants.

Cependant, dans le cadre de la phase 3 de l'expérimentation, la participante principale (non verbale) étant connue, la phase de pairing a pu être personnalisée. Pour ce faire, le fichier audio d'une chanson très appréciée de la participante, a été téléchargé et stocké sur le robot. Ce dernier a été programmé de manière à s'exclamer, juste après la phase de salutations : « Mettons un peu de musique pour se détendre ! » puis à exécuter le fichier audio.

La phase de pairing peut aussi être programmée pour s'adapter automatiquement au sujet. Cela peut se faire au travers d'un jeu de questions-réponses, suivi d'une petite conversation sur un sujet identifié comme d'intérêt pour le participant verbal.

Pour un participant non verbal, il serait utile de disposer d'un écran tactile. Il afficherait des images correspondant aux possibles réponses aux questions successives, formulées par le robot. Dans tous les cas, l'usage de renforçateurs est recommandé. Par exemple, une friandise ou un jouet.

La phase de clôture est simple et courte car nous nous focalisons sur la phase d'imitation. Dans le cadre de la phase expérimentale 3, elle consiste principalement en des remerciements enjoués adressés au participant, de la part du robot, pour avoir bien voulu jouer avec lui.

Elle pourrait également s'adapter au participant, en annonçant la présence d'un objet ou d'une activité d'intérêt pour lui, lors de la séance suivante. Ceci permettrait de lui donner goût aux séances de jeu d'imitation, qu'il associerait progressivement aux renforçateurs utilisés.

5.5.3 Démonstration de gestes consigne et incitation du participant

SIRIA est capable de travailler avec un participant en lui faisant pratiquer l'imitation.

Le système peut montrer au participant des gestes à effectuer et l'inciter à les reproduire.

C'est le robot qui a la charge d'offrir la première démonstration de gestes.

L'accompagnant humain numéro 2, positionné à côté du robot, laisse un peu de temps au participant, en espérant qu'il imite le robot.

Si cela n'est pas le cas, il effectuera le même geste, en demandant au participant d'imiter le robot quand il le répétera.

Ici se trouve une subtilité : il est attendu que le participant imite le robot et non qu'il imite l'accompagnant assurant le rôle d'incitateur visuel. Il faudra bien prêter attention au contenu des séances expérimentales pour évaluer ce qui se passe réellement.

Par ailleurs, l'accompagnant numéro 1, lors de certaines séances, a dû assurer un rôle d'incitation physique, car le participant n'imitait pas le robot, malgré les sollicitations de ce dernier et l'incitation visuelle assurée par l'accompagnant numéro 2.

Détection et reconnaissance des gestes du participant

Comme décrit dans la méthodologie, c'est sur la base des positions relatives et des orientations d'un groupe de points d'un squelette détecté, qu'une pose donnée est identifiée. Un geste, succession de poses, peut ensuite être reconnu.

Dans le cas de QTrobot, l'algorithme propriétaire utilisé reconnaît six gestes nativement : WAVING (salutation), SWIPE UP, SWIPE DOWN, SWIPE LEFT, SWIPE RIGHT et PUSH.

Programmer la reconnaissance de nouveaux gestes avec NuiTrack, se fait dans le cadre de prestations payantes de l'entreprise, ce qui n'est pas en phase avec l'esprit de la recherche scientifique, de l'accès libre à la connaissance, en vue de pouvoir y apporter des contributions. Pour les premiers tests de SIRIA, nous avons procédé à la détection et la reconnaissance du geste de salutation programmé par défaut dans QTrobot.

Cependant, pour une plus grande flexibilité dans le nombre et la nature des gestes qu'il sera possible de reconnaître, il faut utiliser un algorithme non-propriétaire.

Pour utiliser la fonction native de reconnaissance de gestes, nous avons importé la librairie adéquate (*Gestures*) :

```
#!/usr/bin/env python
'''
    Authors: L. N. Vallée
    //CopyPolicy: Released under the terms of the LGPLv2.1 or later, see LGPL.TXT
'''

import sys
import rospy
import cv2
from std_msgs.msg import *
from qt_robot_interface.srv import *
from qt_gesture_controller.srv import *
from qt_nuitrack_app.msg import Gestures
from qt_nuitrack_app.msg import skeletons
```

Figure 22 - Capture de l'import de la librairie Gestures

La figure suivante montre le code de la procédure de reconnaissance de gestes, incluse dans le programme imigame.py, disponible en [Annexe 4](#) :

```

def gesture_reco_proc():
    behaviorTalkText("Mon ami, jouons ensemble!")
    rospy.sleep(1)
    behaviorTalkText("Regarde ce geste")
    gesturePlay("QT/waving", 0)
    behaviorTalkText("Maintenant, essaie de faire comme moi !")
    gesture_sub = rospy.Subscriber('/qt_nuitrack_app/gestures', Gestures, gesture_callback)
    rospy.sleep(15)

    i=0

    while (etat !=1):
        print(etat)
        rospy.sleep(15)
        behaviorTalkText("Allez mon ami, essaie encore si tu veux !")
        i=i+1
        if i == 3:
            break

    if (etat==1):
        behaviorTalkText("Bravo mon ami ! Tu as réussi !")
    else :
        behaviorTalkText("Bon, ce n'est pas grave. Nous essaierons une autre fois !")

    rospy.sleep(0.5)

    behaviorTalkText("Merci d'avoir joué un peu avec moi.")
    gesturePlay("QT/bye-bye", 0)
    emotionShow("QT/happy_blinking")

```

Figure 23 - Capture de la fonction de reconnaissance de gestes

Le robot :

- annonce le début du jeu
- effectue le geste consigne, ici celui de salutations (*waving*)
- demande au participant de l'imiter
- souscrit ensuite au *topic* /qt_nuitrack_app/gestures afin de capter les gestes effectués par le participant

La variable *etat* est une variable globale, définie au préalable et initialisée à zéro.

Elle reste égale à zéro tant que le robot ne détecte pas que le participant a reproduit le geste consigne.

La variable *i* est utilisée afin que le robot n'attende pas indéfiniment. *i* est initialisée à zéro. Le robot patiente quinze secondes, dans l'attente d'une imitation du mouvement par le participant.

Si au bout de cette durée, la variable *etat* est toujours nulle, le robot encourage encore le participant à l'imiter, puis incrémente la variable *i* de 1 et attend encore quinze secondes.

Lorsque *i* a atteint la valeur de 3, sans que la variable *etat* n'ait pris la valeur 1, le robot s'exclame : « Bon, ce n'est pas grave. Nous essaierons une autre fois ! » et passe à la phase de clôture du jeu.

Le participant a donc droit à trois tentatives de reproduction du geste consigne effectué par le robot. On note que la valeur de la variable globale *etat* est affichée à l'écran à chaque nouvelle itération.

Si le robot détecte que le participant a reproduit le geste qu'il lui a montré (i.e. *etat* == 1), il le félicite : « Bravo mon ami ! Tu as réussi ! »

Les deux figurent ci-dessous montrent respectivement :

- le code de la procédure principale (*main*) du programme *imigame.py*
- une capture d'écran pendant l'exécution du programme.

```
if __name__ == '__main__':
    rospy.init_node('imigame')

    # Creation de Publisher et Services
    audioPlay_pub = rospy.Publisher('/qt_robot/audio/play', String, queue_size=10)
    gesturePlay = rospy.ServiceProxy('/qt_robot/gesture/play', gesture_play)
    emotionShow = rospy.ServiceProxy('/qt_robot/emotion/show', emotion_show)
    behaviorTalkText = rospy.ServiceProxy('/qt_robot/behavior/talkText', behavior_talk_text)

    rospy.loginfo("ready...")
    try:
        greetings_procedure()
        gesture_reco_proc()
    except rospy.ROSInterruptException:
        pass
```

Figure 24 - Capture de la procédure principale du code du jeu

La procédure *main* comprend notamment :

- l'initialisation du nœud *imigame*
- la création d'un *Publisher* au *topic* */qt_robot/audio/play* qui permet de lancer une chanson pendant la phase de pairing
- la création du service *gesturePlay* qui permet au robot d'effectuer les gestes préenregistrés qu'on lui indiquera
- la création du service *emotionShow* qui permet au robot d'afficher des émotions préenregistrées : joyeux, triste, surpris, et d'autres au besoin
- la création du service *behaviorTalkText* qui permet au robot de parler
- l'affichage de l'indicateur de démarrage *ready...*
- l'exécution de la fonction *greetings_procedure* qui correspond à la phase de salutations
- l'exécution de la fonction *gesture_reco_proc* qui est utilisée pour la démonstration et la reconnaissance de gestes, dans le cadre de la phase d'imitation.

Lorsque le programme `imigame.py` est lancé, l'indicateur de démarrage s'affiche à l'écran, puis la fonction `greetings_procedure` est exécutée (elle n'affiche rien à l'écran).

Ensuite, la fonction `gesture_reco_proc` est lancée. Comme vu précédemment, elle affiche à l'écran les valeurs de la variable globale `etat`. Ici, lors des trois occasions offertes, le participant n'a pas voulu, ou su, reproduire le geste consigne :

```
qtrobot@QTPC:~/catkin_ws/src/imigame/src$ python imigame.py
[INFO] [1644859372.291569]: ready...
0
0
0
^CTraceback (most recent call last):
  File "imigame.py", line 262, in <module>
    gesture_reco_proc()
  File "imigame.py", line 153, in gesture_reco_proc
    behaviorTalkText("Allez mon ami, essaie encore si tu veux !")
  File "/opt/ros/noetic/lib/python3/dist-packages/rospy/impl/tcpros
```

Figure 25 - Capture du lancement du programme du jeu

5.5.4 Mesure à intervalles réguliers des paramètres de base

Comme décrit dans la section méthodologie, le système mesure toutes les cinq secondes, les valeurs des paramètres suivants :

- distance entre participant et robot
- orientation du corps du participant par rapport au robot
- orientation de la tête du participant par rapport au robot

Lorsqu'on utilise le QTrobot par exemple, un certain nombre de fonctionnalités sont disponibles nativement.

L'algorithme NuiTrack, utilisé pour détecter les squelettes présents dans le champ visuel du robot, offre également des fonctions permettant de mesurer des paramètres tels :

- le nombre d'articulations détectées pour un squelette donné
- le degré de confiance de la détection de chaque articulation
- la distance entre le robot et une articulation donnée
- l'orientation d'une articulation donnée par rapport au robot

5.5.5 Détails de mesure de l'évolution de la distance

Pour une séance expérimentale donnée, toutes les 5 secondes entre le début et la fin de séance, tels que définis dans la section méthodologie, le système mesure la distance entre le participant et le robot.

Le début de la séance est identifié comme t_0 .

La distance initiale entre le robot et le participant, c'est-à-dire lorsque ce dernier se trouve au point de départ, est notée d_0 . Les distances seront exprimées en centimètres.

À t_1 , cinq secondes après t_0 , la participante se trouve à une distance d_1 du robot.

À t_2 , cinq secondes après t_1 , la participante se trouve à une distance d_2 du robot.

La dernière mesure est effectuée à l'instant t_n lorsque la participante se trouve à une distance d_n du robot. ($n * 5$) secondes se sont alors écoulées depuis le début de séance.

Ensuite, on calcule la différence entre la distance finale d_n et la distance initiale d_0 :

$$E_d = d_n - d_0$$

Si E_d est positive et supérieure à 20 centimètres, le participant se sera éloigné du robot.

On distingue deux sous-cas :

- La différence ($d_i - d_{i-1}$) est toujours positive : le score normalisé de distance D sera égal à 1, selon l'échelle présentée dans la section méthodologie.
- Sinon, D sera égal à 2.

Si E_d est comprise entre -20 et +20 centimètres, on considérera que le participant, malgré ses éventuels va-et-vient, sera resté globalement statique.

Le score normalisé de distance D sera égal à 3.

Si E_d est inférieure à -20, cela signifiera que le participant se sera globalement rapproché du robot.

On distinguera alors deux cas :

- Au moins une valeur d_i mesurée était supérieure à d_0 : le score normalisé de distance D sera égal à 4.
- Aucune valeur d_i mesurée n'était supérieure à d_0 : le score normalisé de distance D sera égal à 5. En effet, cela signifiera que la participante ne se sera jamais éloignée du robot par rapport à sa position initiale.

Les règles établies précédemment permettent, dans une partie des cas, d'aboutir aux mêmes résultats que ceux obtenus par l'observateur.

Cependant, il existe des cas limites, qu'il faudra adresser par la suite.

5.5.6 Détails de mesure de l'évolution de l'orientation

Pour une séance expérimentale donnée, toutes les 5 secondes entre le début et la fin de séance, tels que définis dans la section méthodologie, le système mesure :

- l'orientation du corps du participant par rapport à la caméra située juste derrière le robot.
- l'orientation de la tête du participant par rapport à la caméra située juste derrière le robot.

La figure ci-dessous délimite trois cas de figure d'orientation du corps du participant par rapport à la caméra 2 :

- Zone 1 : globalement de face
- Zone 2 : de profil/trois-quart avant
- Zone 3 : de dos/trois-quart arrière

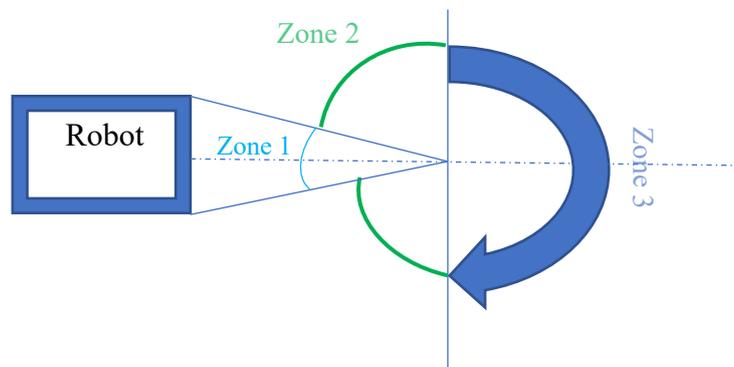


Figure 26 - Schéma des sections d'orientation

Pour chaque mesure d'orientation du corps, le système classe la valeur dans l'une des zones.

Puis il évalue la proportion de mesures dans la zone 3 :

- Plus de 90%
- Entre 60 et 90%
- Entre 30 et 60%
- Entre 10 et 30%
- Moins de 10%

Conformément à l'échelle définie dans la section méthodologie, cela nous permet d'obtenir un score normalisé pour le paramètre d'évolution de l'orientation du corps.

De même pour les mesures d'orientation de la tête.

Le système évalue la proportion de mesures :

- Plus de 90% du temps à regarder dans d'autres directions que vers le robot
- Entre 60 et 90%
- Entre 30 et 60%
- Entre 10 et 30%
- Moins de 10%

5.5.7 Détails de la fonction d'évaluation des signes d'appréciation

Avec la population cible qui est la nôtre, les signes d'appréciation et de joie peuvent être très spécifiques et grandement varier d'un participant à un autre.

Il apparaît difficile de déléguer leur reconnaissance au système informatique. La base de données disponible à ce jour, n'est pas assez riche. Nous recommandons que cette fonction soit confiée à l'observateur humain, partie intégrante du système socio-technique.

5.5.8 Détails de la fonction d'évaluation des tentatives d'imitation

Au vu de notre population cible, nous ne recherchons pas l'imitation à l'identique. L'indulgence est de mise. Ce qui nous intéresse réellement est de pouvoir identifier des tentatives d'imitation. On s'attend à ce que le type de ces dernières varie amplement d'un participant à l'autre, ceci au vu de la diversité présente au sein du spectre autistique.

De plus, en cas de non-imitation, le retour du système ne devrait pas être trop négatif.

Cette fonction d'identification des tentatives d'imitation est difficilement automatisable à l'heure actuelle, dans notre contexte. Lors de l'analyse des résultats au chapitre suivant, nous verrons un exemple de tentative d'imitation, détectable par un observateur humain, mais difficilement par un système informatique, à moins que ce geste du participant n'ait été anticipé.

5.5.9 Détails de la fonction de calcul de l'interaction sociale

Comme indiqué dans la méthodologie, le niveau d'interaction sociale est ensuite calculé sur la base des paramètres mesurés précédemment :

$$IS = D * O_C * O_T + A + B$$

D : niveau d'évolution globale de la distance (échelle de Likert)

O_C : évolution de l'orientation du corps (échelle de Likert)

O_T : évolution de l'orientation de la tête (échelle de Likert)

A : variable binaire indiquant s'il y a eu (1) ou non (0) un signe perceptible d'appréciation de la séance de la part du participant

B : variable binaire indiquant s'il y a eu (1) ou non (0) tentative d'imitation.

5.6 Conclusion du chapitre 4

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre système SIRIA : « Système Social, Informatique et Robotique visant à susciter des Interactions avec des adolescents Autistes ».

Il est constitué d'une partie visible et d'une autre, non visible.

Les principales fonctions assurées par SIRIA ont été décrites, incluant notamment les fonctions de salutations, de détection de squelettes, de reconnaissance de gestes, de mesure des paramètres clés, de calcul du niveau d'interaction sociale.

Cette dernière fonction a été inspirée de [Fridin, 2014] mais profondément modifiée pour tenir compte de nos contraintes spécifiques (population TSA + DI peu verbale, port de masque) et des résultats de nos échanges avec des professionnels de l'autisme et des parents d'enfants ou adolescents avec TSA.

CHAPITRE 5 :
RÉSULTATS & DISCUSSION

6 CHAPITRE 5 – RÉSULTATS ET DISCUSSION

6.1 Introduction

Dans le présent chapitre, nous détaillerons les résultats obtenus lors de chacune des phases expérimentales décrites précédemment.

Il s'agira, pour la première phase expérimentale, de montrer que l'algorithme de détection de squelettes est fonctionnel en environnement réel, et de déterminer d'éventuelles précautions à prendre pour les phases expérimentales suivantes.

Lors de la deuxième phase expérimentale, avec des participants correspondant aux critères d'inclusion mais sans robot, nous évaluerons les tentatives d'imitation et les signes dénotant d'interactions sociales avec l'expérimentateur.

Ensuite, dans la troisième phase expérimentale, les différents paramètres listés dans la section méthodologie, devront être mesurés et leur évolution observée. De plus, le niveau d'interaction sociale devra être obtenu pour certaines des séances expérimentales.

Enfin, les réponses des accompagnants aux questionnaires seront analysées et discutées.

6.2 Résultats de la phase expérimentale 1

Pour rappel, la première phase consistait à tester en environnement réel l'algorithme de détection de poses, et de déduire de ces tests des principes à prendre en compte pour une bonne détection des poses humaines.

Voici les commandes exécutées pour implémenter Tensorflow Pose Estimator :

```
$ git clone https://www.github.com/ildoonet/tf-pose-estimation  
$ cd tf-pose-estimation  
$ pip3 install -r requirements.txt  
$ cd tf_pose/pafprocess  
$ swig -python -c++ pafprocess.i && python3 setup.py build_ext --inplace  
$ python3 run_webcam.py --model=mobilenet_thin --resize=432x368 --camera=0
```

La commande *git clone* sert à copier l'arborescence de fichiers du Tensorflow Pose Estimator dans notre environnement de travail.

Il convient ensuite d'installer tous les modules requis :

argparse

dill

fire

matplotlib

numba

psutil

pycocotools

requests

scikit-image

scipy

slidingwindow

tqdm

`git+https://github.com/ppwwyyxx/tensorpack.git`

Ensuite, depuis le répertoire *tf_pose/pafprocess*, la commande *swig* est exécutée, avec les arguments adéquats, et le fichier de configuration lancé.

La commande *swig* connecte les programmes en C++ avec les programmes Python.

Comme mentionné précédemment, l'interface de programmation d'application de Tensorflow est en Python mais pour l'exécution des applications, le langage C++ est utilisé.

Nous avons ensuite exécuté le fichier *run_webcam.py* avec le modèle et le format de notre choix, et obtenu les résultats présentés sur la figure ci-dessous.

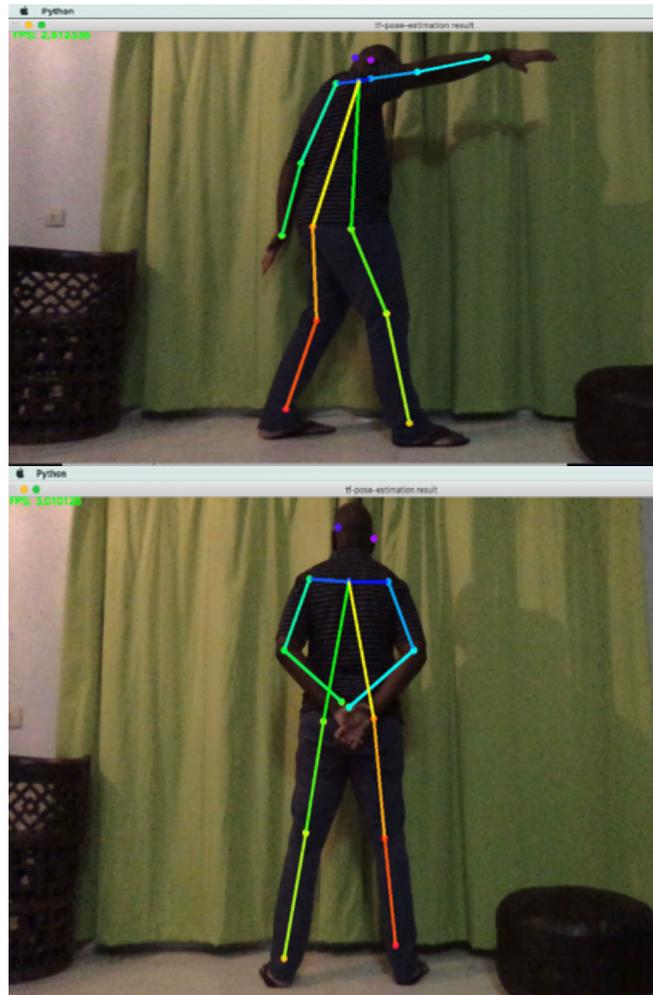
Les articulations du participant sont représentées par des ronds de petite taille : les chevilles, les genoux, les hanches, les poignets, les coudes et les épaules. À cela s'ajoutent les oreilles.

Les lignes droites connectant les articulations sont de couleurs différentes et représentent les différents segments du corps du participant.

6.2.1 Série de tests effectuée avec le Participant 1

Sur la première image capturée, nous voyons notre participant de profil, avec le bras gauche tendu derrière lui et le bras droit levé devant lui, au niveau de la tête. Sa tête est baissée.

En dépit du niveau d'éclairage relativement faible, tous les segments du corps sont correctement détectés, ainsi que les oreilles du participant.



(a)

(b)

Figure 27 - Résultats expérimentaux de l'implémentation de l'algorithme Openpose avec le Participant 1

Sur la seconde image, le participant apparaît de dos. Ses bras sont croisés dans le dos, mains jointes.

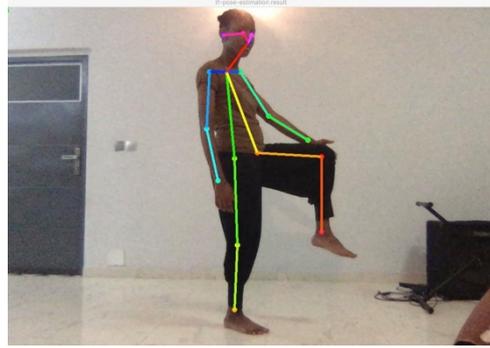
En dépit de la superposition de certaines parties du corps, l'algorithme les détecte correctement.

6.2.2 Série de tests effectuée avec la Participante 2

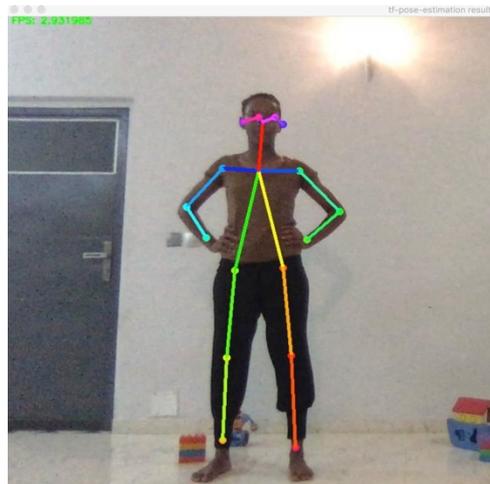
Sur la troisième image capturée, la Participante 2, une adolescente, se tient de profil avec le genou gauche plié, soutenu par la main gauche.

Sur la quatrième image, la participante apparaît de face, les mains à la taille.

Dans les deux cas, on constate que tous les segments sont correctement détectés.



(a)



(b)

Figure 28 - Résultats expérimentaux positifs de l'implémentation de l'algorithme Openpose avec la Participante 2

Sur la cinquième image capturée, on voit deux participants de face. Le plus petit est un enfant (Participant 3) et se tient debout devant la Participante 2. Les jambes de cette dernière ne sont pas correctement détectées car elles sont partiellement masquées par le corps du Participant 3.

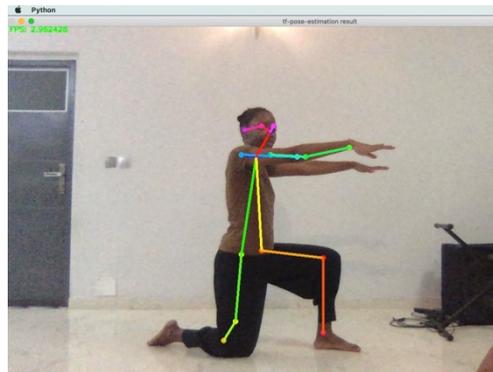
Sur la sixième image, la Participante 2 apparaît de trois-quarts, avec le genou droit à terre, l'autre plié devant, et les mains tendues à l'horizontale.

Son bras gauche n'est pas détecté car occulté par le bras droit.

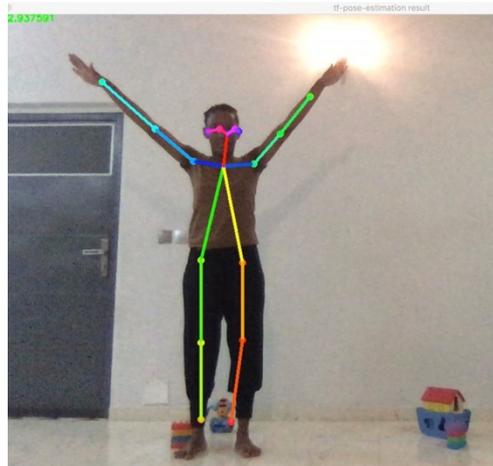
L'algorithme n'est pas parvenu à détecter la partie inférieure de la jambe droite, posée sur le sol.



(a)



(b)



(c)

Figure 29- Échecs de détection complète de squelette

Sur la figure 29, la participante est de face, les bras levés vers le ciel. Toutes les parties du corps sont correctement détectées, mise à part la cheville gauche. Celle-ci est confondue par l'algorithme avec un petit robot en jouet posé juste derrière elle.

Le pourcentage de succès peut être représenté par le nombre de segments correctement détectés divisé par le nombre total de segments détectables. Le tableau ci-dessous illustre ces résultats :

Figure	# segments correctement détectés (/14)	Pourcentage de succès
28.a	14	100 %
28.b	14	100 %
29.a – Participante 3	10	71%
29.a – Participant 2	11	79%
29.b	9	64%
29.c	13	93%

Tableau 10 - Résultats de détection de segments de squelettes

En environnement réel, la détection de squelette peut être effectuée en utilisant l’algorithme Openpose.

Cependant, certains paramètres de l’environnement ainsi que le type de postures incluses dans le jeu, peuvent influencer sur la qualité de la détection.

Par exemple, il faut éviter que des objets soient positionnés trop près du participant car ils peuvent introduire du bruit dans le processus de détection.

6.3 Résultats de la phase expérimentale 2

Pour rappel, cette phase consistait en la stimulation d’une imitation avec quatre adolescents autistes et la génération d’interactions sociales. Le jeu d’imitation était mené par un accompagnant humain.

L’échelle d’évaluation des quatre phases du jeu est présentée dans le chapitre décrivant la méthodologie.

La table ci-après présente les résultats obtenus :

Identifiant du participant	Résultats pour la phase de salutations	Résultats pour la phase de pairing	Résultats pour la phase d'imitation
F	3	3	3a
G	3	3	2a
H	2	3	2a
I	3	3	3b

Tableau 11 - Scores obtenus aux phases du jeu

6.3.1 Résultats de la phase de salutations

Pour les participants F, G et I, la réaction est optimale (niveau 3) lorsque l'expérimentateur principal salue : ils s'approchent et lui tendent la main en réponse.

Quant au participant H, il ne tend pas la main vers l'expérimentateur pour le saluer, mais néanmoins, le regarde ; ce qui correspond au niveau 2 de la phase de salutations.

La réaction aux salutations dépend d'un nombre important de facteurs, notamment l'environnement familial du participant et l'éducation reçue, son niveau d'aise, de confort au démarrage de la séance, la nature et l'attitude de l'interlocuteur.

6.3.2 Résultats de la phase de pairing

Les quatre participants réagissent de manière optimale (niveau 3) lors de la phase de pairing : tous se rapprochent de l'accompagnant humain et/ou montrent des signes d'appréciation, de joie.

Le participant I mettra plus de temps que les autres, environ deux minutes, à se rapprocher de l'interlocuteur. Cela est lié à son niveau élevé de distraction, accentué par les mouvements d'enfants qu'il a aperçus par la fenêtre de la salle d'expérimentation, se dirigeant vers la cantine.

6.3.3 Résultats de la phase d'imitation

Pour rappel, l'imitation spontanée par le participant est d'abord recherchée, puis l'imitation induite. En cas d'échec, l'accompagnant se met à imiter le participant et on évalue sa réaction.

C'est la phase pour laquelle les résultats sont les plus disparates.

En effet, le participant F obtient le score 3a, ce qui signifie que le participant tente d'imiter l'accompagnant et le geste est similaire.

Les participants G et H obtiennent le score 2a, c'est-à-dire qu'ils tentent d'imiter l'accompagnant mais que les gestes effectués ne sont pas similaires, voire peu ressemblants.

Enfin, la réaction du participant I est classifiée au niveau 3b. D'après notre échelle d'évaluation, cela indique qu'aucune tentative d'imitation de la part du participant n'a été perçue. Cependant, par la suite, lorsque l'expérimentateur a commencé à imiter le participant, ce dernier a réagi positivement. Les réactions positives d'une personne à la reconnaissance d'être imité(e) sont généralement des sourires, rires, ou encore une variation du rythme ou du type de ses mouvements afin d'encourager l'imitation. Dans le cas du participant I, il y a eu des sourires, un grand rire et le fredonnement d'une mélodie.

Le tableau suivant présente, par participant, le score CARS et la description qualitative de l'imitation (avec ou sans objets) et du niveau d'interaction sociale perçu lors du jeu d'imitation :

Identifiant du Participant	Score CARS	Description de l'imitation et de l'interaction
F	33	Imitation sans objet, interaction sociale très positive et rapidement établie (regards, sourires)
G	38	Imitation sans objet, interaction sociale très positive et progressivement établie (timidité initiale, puis sourires, accolades et regards)
H	47	Imitation avec objets, interaction sociale moyenne et progressivement établie, Note : H venait de se réveiller ; il aura fallu plus d'une minute pour qu'il commence à imiter.
I	47	Reconnaissance d'être imité (chant), interaction sociale positive et progressivement établie (giggles), Note : J était distrait par les mouvements de l'heure de la cantine et était très mobile.

Tableau 12 - Résultats qualitatifs pour la phase 2

On peut remarquer, à la lumière du rappel des scores CARS des participants, que plus le degré de sévérité de l'autisme est important, plus faible est la capacité d'imitation.

Les participants F et G, avec des scores CARS respectifs de 33 et 38, parviennent à imiter l'accompagnant humain, sans nécessiter d'objets. Pour rappel, l'imitation avec objets est plus accessible que sans.

Le participant H, qui a un score CARS de 47, n'imité pas sans objets, puis parvient à imiter lorsque l'expérimentateur utilise des balles de couleur pour effectuer certains mouvements.

Le participant I présente le même degré de sévérité de l'autisme que H mais lui, n'imité pas. Cependant, il réagit très positivement à la reconnaissance d'être imité : il sourit, rit et fredonne une mélodie.

Pour ce qui est de l'évaluation des interactions sociales, on a pu constater l'établissement d'une interaction sociale positive entre l'expérimentateur et chacun des quatre participants.

Avec le participant F, celle-ci s'est rapidement établie, visible au travers des signes suivants :

- Le participant approche naturellement l'expérimentateur, dès son entrée dans la salle
- Il regarde l'expérimentateur presque constamment
- Il répond aux salutations et invitation à jouer
- Il sourit à plusieurs reprises au cours du jeu
- Il tente, sans équivoque, d'imiter l'expérimentateur

Une interaction sociale positive s'est progressivement établie avec le participant G :

- Des signes de timidité sont perceptibles au départ ; l'approche vers l'expérimentateur se fait lentement
- Des sourires et accolades suivent
- Progressivement, son regard se dirige vers l'expérimentateur et est maintenu
- Plusieurs tentatives d'imitation sont effectuées

Le niveau de l'interaction sociale, progressivement établie avec le participant H, est moyen :

- Il ne s'approche pas de l'expérimentateur au départ et s'assoit même sur la chaise près de la porte, tête baissée
- Il ne regarde presque pas l'expérimentateur pendant la première moitié de la séance
- Lorsque ce dernier fait usage d'accessoires (balles colorées) pour pratiquer l'imitation avec objets, le participant porte plus son regard sur lui.
- Des tentatives d'imitation, avec objet uniquement, sont effectuées

Notons que le participant H venait de se réveiller lorsqu'il a été amené pour la séance de jeu d'imitation. Ceci pourrait être un facteur de son attitude de départ.

Le niveau de l'interaction sociale, progressivement établie avec le participant I, est bon :

- Au départ, il ne s'approche pas de l'expérimentateur mais parcourt la pièce de long en large
- Il porte à peine le regard vers l'expérimentateur pendant les premières minutes, de manière fuyante
- Puis, au fur et à mesure que ce dernier lui parle et l'imité, le participant I le regarde plus souvent
- Et il manifeste des signes d'engagement et de joie : prend la balle de la main de l'expérimentateur, lui sourit et rit même lorsqu'il remarque qu'il l'imité.

Notons que le participant I regardait souvent par la fenêtre et était très distrait par les mouvements de jeunes et d'enfants se dirigeant vers la cantine.

6.4 Analyse des résultats du sondage par questionnaire

L'analyse des questionnaires remplis par les accompagnants, a permis de relever les points suivants. Les difficultés principales rencontrées dans le cadre de la prise en charge des adolescents autistes non verbaux sont liées aux interactions sociales et à la communication. De plus, les paramètres les plus importants pour évaluer l'interaction sociale, seraient le contact visuel, l'orientation du corps et de la tête ainsi que l'existence ou non de réponse aux salutations et invitations à jouer. La majorité des accompagnants interrogés considèrent qu'un robot assistant pourrait être utile dans le cadre des sessions visant à l'amélioration des interactions sociales des participants. De plus, ils seraient disposés à être formés à la manipulation dudit robot.

Par ailleurs, de nombreuses interrogations ont été posées relativement au remplacement éventuel des éducateurs par des robots.

Ces préoccupations seront adressées par la configuration tripartite recommandée pour les sessions.

Enfin, concernant la durée, la fréquence des séances, ainsi que la période globale minimale sur laquelle elles devraient s'étendre, les réponses variaient, mais il y avait consensus sur les points suivants :

- La durée de séance ne devrait pas dépasser une dizaine de minutes car la capacité de concentration de notre population cible est limitée ;

- Les séances devraient être assez rapprochées afin que des bénéfices acquis ne soient pas perdus entre deux séances consécutives ;
- Une période d'expérimentation d'au moins six mois serait souhaitable afin que les bénéfices obtenus puissent être pérennes.

6.5 Résultats de la phase expérimentale 3

Pour rappel, cette phase consiste en des tests de stimulation d'une imitation avec des adolescents autistes et de création d'interactions sociales (robot et accompagnant humain).

Elle s'est déroulée en avril (3a) et juin (3b) 2021, en laboratoire.

6.5.1 Commentaires sur la phase expérimentale 3a

Les 21 et 22 avril ont eu lieu les séances de premier contact et de jeu (phase de salutations) de la participante avec le QTrobot.

Nous proposons tout d'abord une analyse des vidéos de ces séances préliminaires.

Cette expérimentation nous a permis de noter les éléments ci-dessous et de les prendre en compte pour la suite des travaux.

Sur l'environnement

La salle était trop chargée en éléments, sources de distraction pour la participante.

L'environnement devait donc être épuré, ou la salle changée, pour la suite. Le grand écran a été l'un des principaux éléments de distraction. La participante s'y mirait au lieu de regarder le robot.

Sur la participante

Elle n'était pas tout à fait confortable initialement, ce qui a été visible par ses jeux de doigts et la tendance à se cacher la tête sous son vêtement. Cela a mis en évidence la nécessité d'avoir plus de sessions et d'implémenter la phase de pairing.

La participante réagit, d'une façon ou d'une autre, lorsque QT la salue en prononçant son prénom. Le plus souvent, elle le regarde ou interrompt ses gestes répétitifs.

On note également que la participante, lorsqu'elle donne dos au robot, réagit lorsque celui-ci s'arrête de parler.

Sur le scénario du jeu

L'importance de la phase de pairing a été confirmée.

Sur le robot et sa configuration

Certaines phrases sont trop complexes pour la population cible. Il a fallu, par la suite, les simplifier pour s'assurer de leur bonne compréhension par la population cible.

Le fait que la participante ne regarde pas beaucoup le robot de face au départ, nous a interpellés. Le visage du robot étant un écran, cela pouvait être difficile à appréhender pour des autistes qui sont confrontés à un défi avec l'abstraction. L'évolution de cet aspect a été observée dans la suite de l'expérimentation.

Sur l'attitude de l'accompagnant

Si familier(e) du/de la participant(e), il ou elle devrait plus interagir avec le ou la participant(e), en répétant/appuyant ce que dit le robot.

On remarque effectivement l'utilité de l'incitation vocale, visuelle voire physique, pour accroître l'engagement de la participante.

Sur le setup technique

On relève la nécessité de filmer :

- du point de vue du robot, avec la caméra de QT ou une autre située derrière lui (pour continuer de filmer le participant même quand QT tourne la tête).
- le contexte, la scène entière, avec une caméra située dans un angle.

Ces vidéos sont utiles pour illustrer la situation de départ, correspondant aux premiers contacts de la participante avec le QTrobot.

6.5.2 Résultats de la phase expérimentale 3b

En juin 2022, sur trois jours, s'est déroulée la suite de la phase expérimentale 3. Nous en présentons les résultats ci-dessous.

6.5.2.1 Résultats avec la participante J

Les différentes configurations de séances expérimentales ont été détaillées dans la section Méthodologie. Certaines configurations ont été répétées. Cependant, les numéros de séances sont bien uniques, comprenant la date et le numéro de séance pour le jour en question.

Par exemple, 2106-1 correspond à la première séance de la journée du 21 juin, c'est-à-dire le premier jour d'expérimentation du mois de juin.

Comme expliqué précédemment, la majorité des séances ont eu lieu avec le QTrobot et la participante J.

Pour facilement se repérer entre les vidéos et images des différents jours d'expérimentation avec elle, on s'aidera du code vestimentaire de la participante :

- Jour 1 : robe rose fuschia
- Jour 2 : gilet bleu marine et pantalon beige
- Jour 3 : gilet rose bonbon et pantalon sombre

Pendant les trois jours d'expérimentation, on note que la participante réagit à la voix ou au mouvement du robot, le plus souvent en :

- Changeant l'orientation de son corps et/ou de sa tête
- Mettant fin à ses gestes stéréotypés

Ses réactions à la voix ou au mouvement du robot sont généralement positives, excepté dans deux cas :

- Pendant la toute première séance, la participante semble effrayée (agitée, s'accroche à l'éducatrice 1)
- Pendant la séance 2306-4 (SC10, pendant laquelle elle est laissée seule avec le robot), la participante ne veut que s'en éloigner.

L'image ci-dessous montre la participante de profil par rapport au robot. La plupart du temps pendant les deux premières séances de la première journée d'expérimentation, elle est restée dans la zone 3, ou de profil.



Figure 30 - La figure se détourne du robot

Pendant la toute première séance, on a constaté que, la porte de la salle d'expérimentation étant restée ouverte, la participante apparaissait très distraite. Elle avait également tendance à s'accrocher au bras de l'éducatrice 1, jouant le rôle d'incitatrice physique.

Lors de cette séance (2106-1), on note en particulier que :

- La participante ne s'approche pas naturellement du robot
- Elle passe la plus grande partie de la durée de la séance de dos, et de profil
- Elle semble effrayée par le robot
- Aucun signe de joie n'est détecté
- Aucune tentative d'imitation n'est observée.

L'image suivante est extraite de la séance 2106-4. On y voit la participante se tenant à bonne distance du robot, mais le regardant de face.

Au cours de cette séance, la participante :

- S'est approchée naturellement du robot (et le fera presque toujours par la suite, sauf en dans la configuration de session numéro 10)

- Se tenait le plus souvent de profil ou de dos, mis à part lors de cette séquence où elle a passé un moment de face
- A montré des signes de joie qui lui sont spécifiques (voir la vidéo à 1 minute et 17 secondes ou la seconde figure ci-dessous)
- N'a pas tenté d'imiter l'expérimentateur



Figure 31 - La participante fait face au robot mais reste à distance

C'est avec l'aide de l'incitatrice physique que la participante s'est rapprochée, engagée dans le jeu. On la voit battant des mains sur l'image suivante.



Figure 32 - La participante regarde le robot et bat des mains

Le deuxième jour de l'expérimentation de juin, la participante s'approche spontanément du robot, à chaque séance.

En termes d'orientation, elle commence par se maintenir de profil la plupart du temps, comme au cours des séances 2206-1 et 2206-2. Puis, elle se positionne principalement de face mais avec la tête baissée (2206-3).

Ensuite, elle se positionne de profil ou face, en regardant vers le robot (2206-4 et 2206-5).

Enfin, lors de la séance 2206-6, la participante est de face pendant la majorité du temps.

Lors de la séance 2206-1, elle ne présente pas de signe de joie. De plus, plusieurs fois vers le milieu de la séance, elle se dirige vers l'une ou l'autre des éducatrices, et leur prend la main en semblant solliciter de sortir de la salle.

À partir de la séance 2 du deuxième jour, elle affiche des signes d'appréciation, de joie (danse, battements des mains).

Et c'est à partir de la séance 2206-4 qu'elle commence à tenter d'imiter le robot.



Figure 33 - La participante est proche de et observe le robot (2206-1)

Sur l'image suivante, extraite de cette même séance, on voit la participante toucher le robot. On a tendance à interpréter ces contacts physiques comme des signes d'interaction sociale.

Rappelons néanmoins que des échanges avec des professionnels de l'autisme (pédopsychiatres et éducateurs spécialisés) ont permis de comprendre que cela n'est pas nécessairement le cas chez des sujets présentant des troubles du spectre autistique. Une étude plus approfondie, sujet par sujet, serait utile afin de déterminer si le contact physique devrait être considéré comme un élément contribuant à prouver l'existence d'une interaction sociale.



Figure 34 - La participante touche spontanément la main du robot (2206-1)



Figure 35 - La participante manifeste des signes de joie (2206-2)

Au cours de la troisième journée d'expérimentation, pendant toutes les séances, à l'exception de celle avec la configuration numéro 10, la participante :

- S'approche naturellement du robot
- Reste presque toujours de face
- Affiche des signes de joie, d'appréciation de l'activité
- Effectue des tentatives d'imitation



Figure 36 - La participante affiche sa joie en battant des mains (2306)

Pour rappel, pendant la configuration de séance numéro 10, l'éducatrice 2 n'est pas présente dans la pièce. L'éducatrice 1 mène la participante dans la salle puis se retire rapidement, la laissant seule avec le robot.

La séance 2306-4 qui implémente cette configuration, nous montre une participante peu coopérative, qui s'éloigne du robot et reste près de la porte de la salle.

Cette expérience nous confirme l'importance du rôle d'un accompagnant humain au cours des interventions robotiques auprès d'enfants ou adolescents présentant des troubles du spectre autistique.

Les figures ci-dessous présentent une séquence au cours de laquelle la participante se détourne du robot et s'éloigne de lui :



Figure 37 - La participante se détourne et s'éloigne (SC10)

Les tableaux ci-dessous résument, pour chaque séance identifiée, les observations effectuées relativement à :

- L'approche initiale de la participante
- Le fait ou non que la participante se maintienne près du robot en lui faisant face
- L'orientation du corps de la participante
- Ses réactions à la voix ou aux mouvements du robot
- Le nombre de fois que la participante a touché le robot
- Les signes affichés d'appréciation de la séance (signes de joie tel un rire, ou des gestes stéréotypés positifs propres à la participante)
- D'éventuelles tentatives d'imitation au cours de la séance.

Nom et configuration de session	2106-1 (SC 1)	2106-4 (SC 3)	2106-5 (SC 2)	2206-1 (SC 4)	2206-2 (SC 5)	2206-3 (SC 6)	2306-4 (SC 10)
Résultats	N	Y	Y	Y	Y	Y	N

Tableau 13 - Résultats de l'approche initiale vers le robot (Phase 3)

Nom et configuration de session	2106-1 (SC 1)	2106-4 (SC 3)	2106-5 (SC 2)	2206-1 (SC 4)	2206-2 (SC 5)	2206-3 (SC 6)	2306-4 (SC 10)
Résultats	N	N	N	N	Y	Y	N

Tableau 14 - Présence d'un moment "intime" avec le robot

Nom et configuration de session	2106-1 (SC 1)	2106-4 (SC 3)	2106-5 (SC 2)	2206-1 (SC 4)	2206-2 (SC 5)	2206-3 (SC 6)	2306-4 (SC 10)
Résultats	Dos	Profil	Profil	Profil	Profil	Face	Dos

Note : en SC6, de face la plupart du temps, mais tête baissée

Tableau 15 - Orientation dominante du corps

Nom et configuration de session	2106-1 (SC 1)	2106-4 (SC 3)	2106-5 (SC 2)	2206-1 (SC 4)	2206-2 (SC 5)	2206-3 (SC 6)	2306-4 (SC 10)
Résultats	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non

Tableau 16 - Évaluation de la présence d'une réaction positive au robot

Nom et configuration de session	2106-1 (SC 1)	2106-4 (SC 3)	2106-5 (SC 2)	2206-1 (SC 4)	2206-2 (SC 5)	2206-3 (SC 6)	2306-4 (SC 10)
Résultats	1	0	0	1	0	0	0

Tableau 17 - Nombre de contacts physiques avec le robot

Nom et configuration de session	2106-1 (SC 1)	2106-4 (SC 3)	2106-5 (SC 2)	2206-1 (SC 4)	2206-2 (SC 5)	2206-3 (SC 6)	2306-4 (SC 10)
Résultats	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non

Tableau 18 - Évaluation de la présence de signes de joie

Nom et configuration de session	2106-1 (SC 1)	2106-4 (SC 3)	2106-5 (SC 2)	2206-1 (SC 4)	2206-2 (SC 5)	2206-3 (SC 6)	2306-4 (SC 10)
Résultats	Non	Oui	Non	Non	Non	Oui	Non

Tableau 19 - Évaluation de la présence de tentatives d'imitation

Évaluation de l'évolution de la distance et de l'orientation au cours des séances

Le tableau ci-après présente les scores globaux de distance et d'orientation pour plusieurs configurations de séances :

Paramètres	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6	SC10
Distance	2	2	2	2	3	3	1
Orientation	1	2	2	2	2	3	1

Tableau 20 – Évaluation des scores globaux de distance et d'orientation

Les deux figures suivantes constituent les représentations graphiques de :

- L'évolution de la distance au cours des séances
- L'évolution de l'orientation

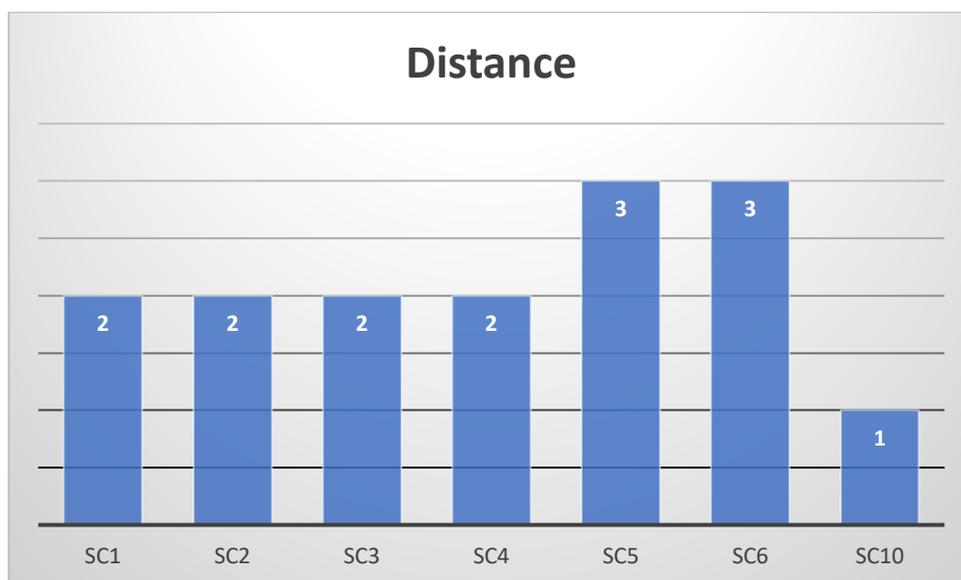


Figure 38 - Graphe de l'évolution globale de distance

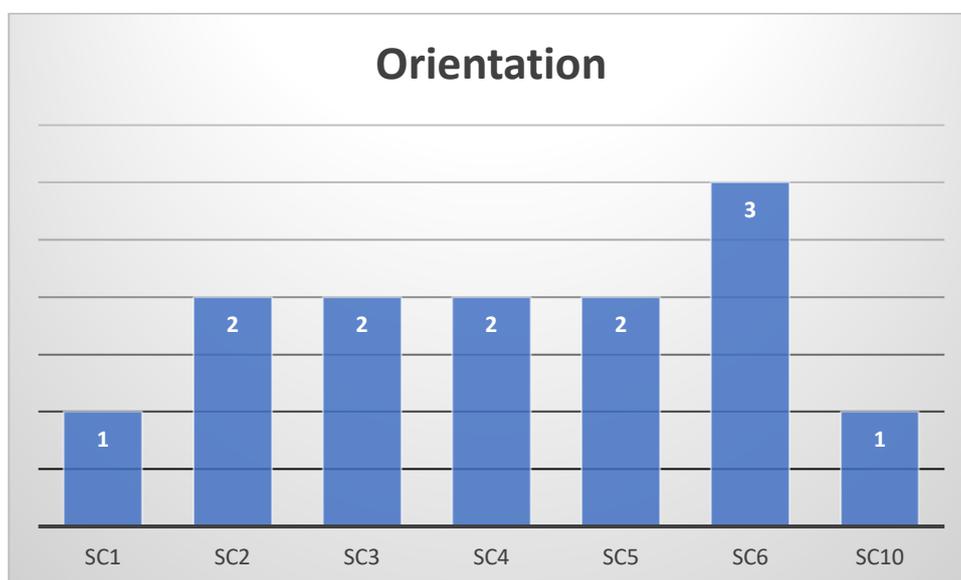


Figure 39 - Graphe de l'évolution globale de l'orientation

Comme détaillé dans la méthodologie, pour chaque séance, le niveau d'interaction sociale peut être calculé à partir des mesures des scores d'évolution de :

- La distance
- L'orientation du corps
- L'orientation de la tête

À ces paramètres, les suivants peuvent être ajoutés :

- Le nombre de signes de joie/d'appréciation de la séance (*A*)
- L'existence de tentatives d'imitation (*B*)

Suivent quelques exemples, compilés dans un tableau.

Identifiant de séance	Score d'évolution de la distance D	Score d'évolution de l'orientation du corps O_C	Score d'évolution de l'orientation de la tête O_T	Niveau d'interaction sociale IS
2106-1	1	1	1	$1*1*1+0+0 = 1$
2106-4	1	1	1	$1*1*1 + 1 + 1 = 3$
2106-5	1	1	1	$1*1*1 + 1 + 0 = 2$
2206-1	2	2	2	$2*2*2+0+0 = 8$
2206-2	2	3	2	$2*3*2 + 1 + 0 = 13$
2206-3	3	3	1	$3*3*1 + 1 + 0 = 10$
2206-5	2	3	1	$2*3*1 + 1 + 1 = 8$
2206-6	2	3	1	$2*3*1 + 1 + 1 = 8$
2306-1	2	3	2	$2*3*2 + 1 + 1 = 14$
2306-2	2	3	2	$2*3*2 + 1 + 1 = 14$
2306-4	1	1	1	$1*1*1+0+0 = 1$

Tableau 19 - Calculs des niveaux d'interaction sociale

Dans la colonne Niveau d'interaction sociale IS , le premier chiffre de la somme est calculé comme suit :

$$IS_1 = D * O_C * O_T$$

On y ajoute ensuite les valeurs des paramètres binaires A et B, afin d'obtenir le résultat final du niveau d'interaction sociale entre la participante et le robot, pour la séance en question.

Pour un jour d'expérimentation donné, on constate que le niveau d'interaction sociale commence par augmenter au fil des premières séances, puis diminue.

On explique l'amélioration initiale du niveau d'interaction sociale par le fait que la participante est de plus en plus à l'aise avec le robot. Progressivement, elle ose se positionner face à lui, puis le regarder.

La dégradation que l'on note au bout de quelques séances, semble être due au niveau de fatigue de la participante, ou à une baisse de son intérêt pour le robot et le jeu qu'il propose.

6.5.2.2 Résultats avec le participant K

Pour rappel, K est un préadolescent ayant formellement reçu le diagnostic d'autisme Asperger. Il s'est montré très motivé à l'idée de rencontrer le robot. Au moment d'entrer dans la salle d'expérimentation, il a formellement interdit à l'accompagnant, ainsi qu'à sa mère, de le suivre. Ses premières actions ont été de tourner autour du QTrobot pour l'observer sous tous ses angles, l'analyser en détail, puis de revenir vers la salle d'attente pour nous fournir des éléments qui ressemblaient fortement à un extrait de fiche de spécifications techniques du robot. En effet, le participant K a annoncé de manière victorieuse, que le robot avait une caméra et deux capteurs de mouvements.

Une fois le participant retourné face au robot, le scénario du jeu d'imitation a été lancé pour être déroulé par QTrobot, sans accompagnant humain, afin de respecter la volonté clairement énoncée par le préadolescent.

Le participant a imité les gestes consignés à l'identique et ceux-ci ont été détectés par QTrobot. Au bout de trois imitations de gestes, le participant autiste Asperger a indiqué n'avoir plus envie de jouer avec QT. Cela était prévisible puisque le scénario du jeu a été conçu pour des adolescents avec troubles du spectre autistique et déficit intellectuel.

Nous avons donc mis fin à cette première séance.

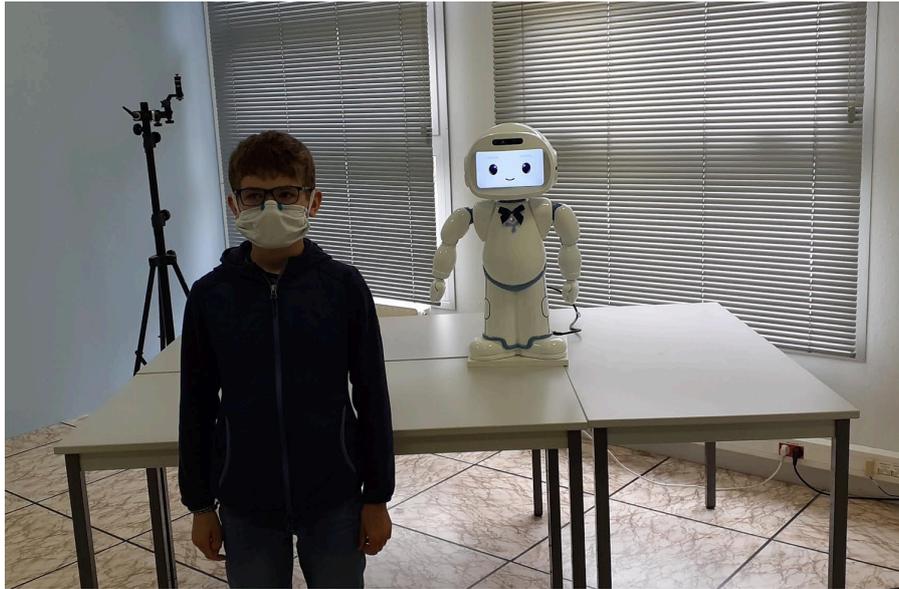


Figure 40 - Participant K with QTrobot

Lors de la seconde séance avec le participant K, les deux robots sociaux étaient présents : QTrobot, posé sur sa table, et Pepper, plus grand, posé directement sur le sol.

L'accompagnante s'est introduite dans la salle à la suite du participant.

Le scénario de jeu a été lancé par QTrobot dans un premier temps.

Le préadolescent n'y a pas participé, obnubilé par le robot Pepper, qu'il a analysé en détails.

Pepper a ensuite pris la parole pour saluer le participant, qui a souri, l'air fasciné.

Une conversation s'est ensuite établie entre Pepper et le joueur K. Pepper lui a demandé comment il allait. Il a répondu puis a retourné la question au robot, qui y a répondu, avant de le remercier. L'accompagnante a ensuite guidé le participant vers le type de demandes que Pepper pouvait comprendre et auxquelles il pouvait répondre. Une conversation riche s'en est suivie, pleine de sourires de la part du participant, mais également de moments de frustration lorsqu'il y avait des incompréhensions de la part de Pepper.

L'opérateur a ensuite fait parler Pepper en mode « magicien d'Oz » afin d'apaiser le participant puis de rediriger son attention vers QTrobot, qui a relancé le jeu d'imitation. Cette fois, le participant a bien voulu y participer. Il avait eu l'occasion d'explorer la nouveauté qui se tenait devant ses yeux initialement (Pepper) et d'en arriver à la connaître assez pour que son attention puisse alors se porter sur un autre élément.

Suite à cette seconde séance, le participant K s'est néanmoins exclamé préférer Pepper. À la question du pourquoi, il a mentionné les raisons suivantes :

- « Pepper est plus intéressant »

- « Il me fait rire »
- « On peut bien discuter avec lui. Il répond aux questions, enfin quand il les comprend ! »

Néanmoins, à la question de savoir lequel des deux il préférerait physiquement, le participant a répondu QTrobot, du fait de ses sourires (son expressivité faciale).

En [Annexe 6](#) le retour détaillé de la mère du Participant K suite à l'expérimentation. Celle-ci nous contacte parfois pour demander quand nous pourrions de nouveau organiser des séances pour son fils.

6.6 Discussion

Les présents travaux de recherche s'inscrivent dans un domaine très riche, qui est celui de l'interaction humain-robot, à l'interface notamment de l'interaction humain-machine, de la robotique, de l'intelligence artificielle, des neurosciences et de la psychologie sociale.

En sus de l'hétérogénéité de ce domaine, requérant des connaissances dans des disciplines diverses, la population que nous avons choisie, ajoute au niveau de complexité de notre problématique. En effet, les personnes autistes ayant des difficultés tant de communication, d'interactions sociales que de comportements, parvenir à mener un jeu d'imitation gestuelle avec ces participants, est naturellement plus délicat qu'avec des personnes dites neuro-typiques, c'est-à-dire dont le développement correspond à celui de la majorité des personnes. De plus, les troubles du spectre autistique sont très divers. La DSM-V tente de les catégoriser pour faciliter le diagnostic et la prise en charge. Mais en fait, chaque individu présentant des troubles du spectre autistique, constitue un profil très spécifique, et les résultats obtenus varient beaucoup d'une personne à l'autre.

De surcroît, les adolescents autistes auxquels nous avons décidé de nous consacrer présentent un déficit intellectuel. Leur compréhension d'un certain nombre de consignes et stimuli, en est rendue plus difficile. Nous avons décidé de cibler cette population très spécifique car la majorité des études portant sur des interventions robotiques avec des autistes, ne s'y intéressent pas (Mazon, 2018).

Pour en revenir à la complexité technique, les algorithmes actuels de détection de poses et de reconnaissance de gestes, ne sont pas encore optimaux. De nombreux facteurs affectent les taux de succès, dont la luminosité, les cas d'occlusion, le type de vêtements.

Et dans notre cas, il y a une difficulté supplémentaire liée à la spécificité de la population cible. En effet, nous ne recherchons pas l'imitation à l'identique mais souhaitons détecter des

« intentions » et « tentatives » d'imitation. Certains gestes effectués par les participants autistes, même si parfois différents du geste consigne donné par le robot, devraient néanmoins être identifiés comme des tentatives d'imitation.

Les algorithmes standard doivent donc être adaptés. Deux approches ont été envisagées.

La première était celle d'un apprentissage supervisé simple. Il s'agissait de créer un jeu de données conséquent, contenant pour chaque pose constituant chaque geste, un répertoire comprenant des photos de nombreuses variantes possibles. Cela s'est avéré extrêmement chronophage, car les variantes de chaque geste sont quasi-infinies.

La deuxième approche était d'avoir un algorithme capable d'inférer les multiples variantes d'un même geste, à partir d'un jeu de données plus restreint. Il s'agissait de considérer par exemple, des variations de positions et d'orientations, pour les différents segments du corps impliqués dans chacune des poses constituant un geste donné. Cette approche n'avait pas été initialement choisie. Cependant, lors des sessions expérimentales, voyant la diversité des réponses possibles que nous pouvions obtenir de la part des adolescents avec TSA et DI, il s'est imposé à nous que la première approche ne pourrait convenir.

Le développement d'un algorithme tel que décrit dans la description synthétique de la seconde approche, est donc intégré aux perspectives des présents travaux de recherche.

À ce stade, nous pouvons affirmer que la reconnaissance automatisée des gestes d'adolescents présentant des troubles du spectre autistique et un déficit intellectuel, est un objectif très ambitieux. L'étape intermédiaire de la détection d'un mouvement réponse aux incitations du robot, de la part des participants, était importante à valider. Pour ce qui est de la reconnaissance des tentatives d'imitation, quel que soit leur écart par rapport aux gestes consignes, la seconde approche décrite est fortement recommandée.

Nous avons consolidé l'ensemble de nos résultats dans les articles suivants :

[Vallée, 2020] Vallée, L. N., Sao Mai Nguyen, C. L., Kanellos, I., & Asseu, O. (2020). Human Skeleton Detection, Modeling and Gesture Imitation Learning for a Social Purpose. *Engineering*, 12(02), 90-98.

[Vallée, 2020] Vallée, L. N., Lohr, C., Nguyen, S. M., Kanellos, I., & Asseu, O. (2020). Building An Automated Gesture Imitation Game For Teenagers with ASD. *arXiv preprint arXiv:2007.04604*.

[Vallée, 2020] Vallée, L. N., Nguyen, S. M., Lohr, C., Kanellos, I., & Asseu, O. (2020). How An Automated Gesture Imitation Game Can Improve Social Interactions With Teenagers With ASD. *arXiv preprint arXiv:2007.05394*.

Un quatrième article, *Generating social interactions with adolescents with autism spectrum disorder, through a gesture imitation game led by a humanoid robot, in collaboration with a human educator*, a été soumis à l'*International Journal of Social Robotics*, de l'éditeur *Springer*.

Enfin, une communication a été acceptée dans le cadre du premier colloque ivoirien sur l'autisme, prévu en mai 2022, mais reporté au mois de juin du fait de la tenue de la COP 15 à Abidjan. Elle s'intitule : *L'intelligence artificielle et la robotique sociale au service d'un accompagnement adéquat des personnes avec troubles du spectre autistique*.

6.7 Conclusion du chapitre 5

Les réponses des accompagnants aux questionnaires ont validé la pertinence de certains de nos choix de base. Notamment, le fait de cibler principalement une amélioration des interactions sociales avec les participants, ainsi que celui de faire appel à un robot assistant pour ce faire.

Nous remarquons, au cours des expérimentations menées, que l'imitation est possible avec des préadolescents et adolescents autistes avec déficit intellectuel.

Aussi, au fur et à mesure que la participante principale de la phase 3 s'habitue au robot, son approche initiale est plus fluide : elle s'avance plus rapidement vers lui.

De même, elle a de plus en plus tendance à regarder vers le robot et à maintenir son corps de profil ou de face, plutôt que de dos.

En procédant au calcul du niveau d'interaction sociale, pour chaque séance, et conformément à la formule que nous avons proposée dans la section méthodologie, nous réalisons que le niveau d'interaction sociale varie en fonction du jour d'expérimentation, du numéro de la session au sein d'un jour donné et de certains paramètres liés à la configuration de session.

Il nous faudrait pouvoir mener de nouvelles expérimentations, sur une plus longue durée et en figeant certains paramètres, afin de confirmer l'évolution du niveau d'interaction sociale. Ces résultats préliminaires obtenus avec une même participante, devraient être comparés avec ceux de sessions expérimentales menées avec au moins une douzaine de participants correspondant à nos critères d'inclusion. Si nous voulons voir nos résultats validés au niveau clinique, une trentaine de participants autistes, et un même nombre de neurotypiques, seraient nécessaires.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

7 CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Tout au long du présent manuscrit, nous avons procédé, étape par étape, avec pour objectif de défendre la thèse que nous avons avancée. À savoir qu'il est possible de susciter des interactions sociales avec des préadolescents et adolescents présentant des troubles du spectre autistique, combiné avec un handicap cognitif, par la pratique ludique de l'imitation à l'aide d'un robot assistant.

Les termes clés employés, tels l'autisme et les troubles du spectre autistique, l'interaction sociale, l'imitation et l'interaction humain-robot, ont été définis dès l'introduction. La revue de littérature contenue dans le premier chapitre nous a permis, en premier lieu, de comprendre l'importance du processus de l'imitation dans celui du développement. En second lieu, il s'agissait de découvrir comment des jeux d'imitation avaient été utilisés avec des enfants autistes, afin de prouver leurs capacités imitatives, malgré un déficit avéré. Puis, de tenter d'améliorer lesdites capacités ainsi que le niveau d'interactions sociales de ces enfants. Enfin, entreprendre de limiter leurs comportements stéréotypés et réduire le degré de sévérité de leur condition. En troisième lieu, ont été résumés les principaux résultats d'un sondage portant sur les interventions robotiques dans le cadre de l'accompagnement des enfants, préadolescents et adolescents autistes. Certaines des conclusions de cette étude sont déterminantes pour l'orientation de nos travaux de recherche.

Nous avons ensuite abordé le domaine de l'intelligence artificielle en étudiant le processus de programmation par démonstration, les types d'apprentissage automatique existants, et des algorithmes de reconnaissance de poses ou de gestes. Cela était important dans la mesure où lorsque le robot imite aussi le participant, il est possible d'exploiter le pouvoir de la reconnaissance d'être imité(e) afin de contribuer à la génération de liens sociaux. En effet, quand une personne constate qu'elle est imitée, elle réalise que ce qu'elle est, ou ce qu'elle fait, présente un intérêt pour l'autre. Elle lui accorde alors plus d'attention et cela peut même accroître son estime d'elle-même, en plus de susciter des interactions sociales avec l'autre personne. Mais avant d'être en mesure de reconnaître une pose humaine, il faut au préalable avoir détecté le squelette concerné, à l'aide d'un algorithme approprié. Nous en avons proposé un, accessible sans licence et dont l'efficacité a été prouvée. Une modélisation de l'espace de poses humaines a été présentée, fondée sur les positions relatives et les orientations des articulations du corps.

Par la suite, nous avons présenté plusieurs études incluant des jeux sérieux avec agents virtuels, ou des robots, et qui avaient été menées en vue d'améliorer les interactions sociales avec des enfants présentant des troubles du spectre autistique. Ces travaux ont montré l'efficacité des « serious games » et des robots sociaux dans ce cadre, en révélant qu'un robot permettait, du fait de sa corporéité, d'obtenir de meilleurs résultats qu'un agent virtuel. Les articles sur les interventions robotiques avec des enfants autistes, fournissent également de précieuses recommandations quant à la préparation et l'implémentation de telles sessions expérimentales. Nous fondant sur lesdites recommandations et sur celles issues des échanges avec des professionnels de l'autisme, ainsi que des parents d'enfants, préadolescents ou adolescents autistes, nous avons proposé une méthodologie précise. Elle consiste notamment en des entretiens semi-dirigés, des questionnaires aux accompagnants, des canevas de séances, des protocoles de consentement, une structure de jeu d'imitation composée de quatre phases, une liste de paramètres à mesurer ainsi qu'une méthode de mesure, et un protocole d'évaluation impliquant nécessairement des professionnels de l'autisme.

Les paramètres que nous avons proposé de mesurer sont l'évolution globale de la distance entre le participant et le robot, l'évolution globale de l'orientation du corps et de la tête du participant par rapport au robot, l'apparition ou non de signes d'appréciation de la séance, ainsi que celle de tentatives d'imitation de la part du participant. Une formule a été composée, sur la base de ces différents paramètres, afin d'évaluer le niveau des interactions sociales du participant pour une séance donnée.

Le scénario de jeu d'imitation a été implémenté, d'abord sans robot, avec des participants correspondant aux critères d'inclusion fixés au départ, puis avec un robot assistant. Dans le cadre de la phase expérimentale sans robot, l'imitation n'a été possible qu'avec trois participants sur quatre, mais des interactions sociales ont pu être suscitées avec l'ensemble des participants, à force de travail, de répétitions, de sourires. La tenue de telles sessions demande une grande énergie et beaucoup de patience. Faire appel à un robot assistant permet de réduire la pénibilité du travail des accompagnants des participants autistes. Cependant, même lors d'interventions robotiques, la présence d'un accompagnant humain apparaît cruciale afin de permettre l'engagement des participants autistes avec déficit intellectuel. Cela a été fortement recommandé, à la suite de plusieurs études dans ce domaine. Mais alors, l'accompagnant n'est pas autant sollicité et éprouvé que dans le cadre d'une séance sans robot. Cela permet donc d'avoir un rythme de séances plus soutenu, sur une période de plusieurs mois voire années, afin de maximiser les résultats en termes d'amélioration des capacités imitatives et d'interaction sociale. Lors des sessions expérimentales avec le robot, qui se sont étendues sur plus d'une

journée, nous avons noté qu'au fur et à mesure des séances, la distance entre participant et robot était réduite, et l'orientation relative améliorée. De plus, des signes d'appréciation des séances, ainsi que des tentatives d'imitation, ont été perçus. Tout cela a contribué à montrer que des interactions sociales peuvent être suscitées avec des préadolescents et adolescents autistes avec déficit intellectuel, par la pratique ludique de l'imitation gestuelle.

En termes de perspectives, il serait intéressant d'introduire un robot social au sein d'un établissement spécialisé accompagnant des préadolescents et adolescents autistes avec handicap cognitif, et de mener des séances de jeu d'imitation, trois fois par semaine, pendant au moins six mois. Cela permettrait d'évaluer les effets de la pratique, à plus long terme, de l'imitation sur les capacités imitatives et d'interaction sociale de notre population cible. Les liens entre l'évolution de ces compétences et les facteurs suivants pourraient également être étudiés : l'âge neurodéveloppemental, le degré de sévérité de l'autisme, les origines sociale et culturelle des participants.

Il serait également utile de comparer plusieurs types de robots humanoïdes : de degrés d'autonomie différents, avec ou sans écran au niveau du visage, mobiles ou non.

Au niveau de l'imitation, il serait bon de travailler à la reconnaissance de mouvements de complexité supérieure, effectués avec ou sans objets physiques.

Enfin, dans le cadre de nos expérimentations d'avril et juin 2021, nous avons dû composer avec la contrainte du port obligatoire du masque, du fait de la pandémie. Or, les expressions faciales jouent un rôle important dans le cadre de scénarii relatifs aux interactions sociales. Il serait donc utile de mener des sessions expérimentales sans masques faciaux, et cela même si beaucoup d'autistes sont confrontés à des difficultés d'expression ou de reconnaissance des émotions, même les plus basiques.

RÉFÉRENCES

8 RÉFÉRENCES

[Anzulewicz, 2016] Anzulewicz A, Sobota K, Delafield-Butt JT. Toward the Autism Motor Signature: Gesture patterns during smart tablet gameplay identify children with autism. *Scientific Reports*. 2016;6(July):1–13.

[Bachmann, 1999] Bachmann, E. R., Duman, I., Usta, U. Y., McGhee, R. B., Yun, X. P., & Zyda, M. J. (1999, November). Orientation tracking for humans and robots using inertial sensors. In *Proceedings 1999 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation. CIRA'99 (Cat. No. 99EX375)* (pp. 187-194). IEEE.

[Baron-Cohen, 1985] Baron-Cohen, S. (1985). *Social cognition and pretend play in autism* (Doctoral dissertation, University of London).

[Baron-Cohen, 1985] Baron-Cohen, S., Leslie, A. M., & Frith, U. (1985). Does the autistic child have a “theory of mind”? *Cognition*, 21(1), 37-46.

[Baron-Cohen, 1986] Baron-Cohen, S., Leslie, A. M., & Frith, U. (1986). Mechanical, behavioural and intentional understanding of picture stories in autistic children. *British Journal of developmental psychology*, 4(2), 113-125.

[Baron-Cohen, 1987] Baron-Cohen, S. (1987). Autism and symbolic play. *British journal of developmental psychology*, 5(2), 139-148.

[Baron-Cohen, 1988] Baron-Cohen, S. (1988). Social and pragmatic deficits in autism: Cognitive or affective?. *Journal of autism and developmental disorders*, 18(3), 379-402.

[Baron-Cohen, 1991] Baron-Cohen, S. (1991). The theory of mind deficit in autism: How specific is it?. *British Journal of Developmental Psychology*, 9(2), 301-314.

[Baron-Cohen, 2001] Baron-Cohen, S. (2001). Theory of mind in normal development and autism. *Prisme*, 34(1), 74-183.

[Ben-Youssef, 2017] Ben-Youssef A, Clavel C, Essid S, Bilac M, Chamoux M, Lim A. UE-HRI: A new dataset for the study of user engagement in spontaneous human-robot interactions.

ICMI 2017—Proceedings of the 19th ACM International Conference on Multimodal Interaction. 2017; p. 464–472.

[Bendiouis, 2015] Bendiouis, S., Imitation et communication chez le jeune enfant avec autisme. Psychologie. Université Paul Valéry - Montpellier III, 2015. Français. NNT : 2015MON30017.

[Bernardini, 2014] Bernardini, Sara & Porayska-Pomsta, Kaska & Smith, Tim. (2014). ECHOES: An intelligent serious game for fostering social communication in children with autism. *Information Sciences*. 264. 41–60. 10.1016/j.ins.2013.10.027.

[Billing, 2020] Billing, E., Belpaeme, T., Cai, H., Cao, H. L., Ciocan, A., Costescu, C., ... & Ziemke, T. (2020). The DREAM Dataset: Supporting a data-driven study of autism spectrum disorder and robot enhanced therapy. *PloS one*, 15(8), e0236939.

[Chiarotti, 2020] Chiarotti, F., & Venerosi, A. (2020). Epidemiology of autism spectrum disorders: a review of worldwide prevalence estimates since 2014. *Brain sciences*, 10(5), 274.

[Coeckelbergh, 2015] Coeckelbergh, M., Pop, C., Simut, R., & Peca, A. (2015, October). Survey investigating ethical issues concerning Robot Enhanced Therapy for children with autism. In *New Friends: The 1st international conference on social robots in therapy and education* (pp. 90-91).

[Colombi, 2019] Colombi, C., Vivanti, G., & Rogers, S. (2019). Evidenced-based practices. In *Handbook of interdisciplinary treatments for autism Spectrum disorder* (pp. 9-28). Springer, Cham.

[Costa, 2015] Costa, S., Lehmann, H., Dautenhahn, K., Robins, B., & Soares, F. (2015). Using a humanoid robot to elicit body awareness and appropriate physical interaction in children with autism. *International journal of social robotics*, 7(2), 265-278.

[Costescu, 2015] Costescu, C. A., Vanderborght, B., & David, D. O. (2015). Reversal learning task in children with autism spectrum disorder: a robot-based approach. *Journal of autism and developmental disorders*, 45(11), 3715-3725.

[Dahlberg, 2006] Dahlberg, C., Hawley, L., Morey, C., Newman, J., Cusick, C. P., & Harrison-Felix, C. (2006). Social communication skills in persons with post-acute traumatic brain injury: Three perspectives. *Brain injury*, 20(4), 425-435.

[Dautenhahn, 1999] Dautenhahn, K. (1999, August). Robots as social actors: Aurora and the case of autism. In *Proc. CT99, The Third International Cognitive Technology Conference, August, San Francisco* (Vol. 359, p. 374).

[Dautenhahn, 2007] Dautenhahn, K. (2007). Socially intelligent robots: dimensions of human-robot interaction. *Philosophical transactions of the royal society B: Biological sciences*, 362(1480), 679-704.

[Dautenhahn, 2007] Dautenhahn, K. (2007). Methodology & themes of human-robot interaction: A growing research field. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 4(1), 15.

[Dautenhahn, 2018] Dautenhahn, K. (2018). Some brief thoughts on the past and future of human-robot interaction. *ACM Transactions on Human-Robot Interaction (THRI)*, 7(1), 1-3.

[DeMyer, 1972] DeMyer, M. K., Alpern, G. D., Barton, S., DeMyer, W. E., Churchill, D. W., Hingtgen, J. N., ... & Kimberlin, C. (1972). Imitation in autistic, early schizophrenic, and non-psychotic subnormal children. *Journal of autism and childhood schizophrenia*, 2(3), 264-287.

[Devanne, 2017] Devanne, M. (2017, November). Multi-level motion analysis for physical exercises assessment in kinaesthetic rehabilitation. In *2017 IEEE-RAS 17th International Conference on Humanoid Robotics (Humanoids)* (pp. 529-534). IEEE.

[Devanne, 2018] Devanne, M., & Sao Nguyen, M. (2018). Generating shared latent variables for robots to imitate human movements and understand their physical limitations. In *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV) Workshops* (pp. 0-0).

[Dickstein-Fischer, 2014] Dickstein-Fischer, L., & Fischer, G. S. (2014, August). Combining psychological and engineering approaches to utilizing social robots with children with Autism. In *2014 36th annual international conference of the IEEE engineering in medicine and biology society* (pp. 792-795). IEEE.

[Duquette, 2008] Duquette, A., Michaud, F., & Mercier, H. (2008). Exploring the use of a mobile robot as an imitation agent with children with low-functioning autism. *Autonomous Robots*, 24(2), 147-157.

[Elsabbagh, 2012] Elsabbagh, M., Divan, G., Koh, Y. J., Kim, Y. S., Kauchali, S., Marcín, C., ... & Fombonne, E. (2012). Global prevalence of autism and other pervasive developmental disorders. *Autism research*, 5(3), 160-179.

[Favrot-Meunier, 2019] Favrot-Meunier, Claire & Saint-Georges-Chaumet, Yann & Saint-georges, Catherine. (2019). Suivi qualitatif de l'évolution de 120 enfants porteurs de troubles du spectre autistique pris en charge par la méthode des 3i. *L'Évolution Psychiatrique*. 84. 10.1016/j.evopsy.2019.08.002.

[Fein, 2011] Fein, D. (Ed.). (2011). *The neuropsychology of autism*. Oxford University Press.

[Fisher, 2010] Fisher, A. G., & Griswold, L. A. (2010). *Evaluation of social interaction (ESI)*. Fort Collins, CO: Three Star Press.

[Forsyth, 1999] Forsyth, K., Lai, J. S., & Kielhofner, G. (1999). The assessment of communication and interaction skills (ACIS): Measurement properties. *British Journal of Occupational Therapy*, 62(2), 69-74.

[Fridin, 2014] Fridin, M., & Belokopytov, M. (2014). Embodied robot versus virtual agent: Involvement of preschool children in motor task performance. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 30(6), 459-469.

[Gal, 2015] Gal, E., Landes, E., & Katz, N. (2015). Work performance skills in adults with and without high functioning autism spectrum disorders (HFASD). *Research in Autism Spectrum Disorders*, 10, 71-77.

[Grossard, 2017] Grossard, C., Grynspan, O., Serret, S., Jouen, A. L., Bailly, K., & Cohen, D. (2017). Serious games to teach social interactions and emotions to individuals with autism spectrum disorders (ASD). *Computers & Education*, 113, 195-211.

[Grossard, 2018] Grossard, C., Palestra, G., Xavier, J., Chetouani, M., Grynszpan, O., & Cohen, D. (2018). ICT and autism care: state of the art. *Current opinion in psychiatry*, 31(6), 474-483.

[Hall, 1963] Hall, E. T. (1963). A system for the notation of proxemic behavior. *American anthropologist*, 65(5), 1003-1026.

[Happé, 1994] Happé, F. G. (1994). An advanced test of theory of mind: Understanding of story characters' thoughts and feelings by able autistic, mentally handicapped, and normal children and adults. *Journal of autism and Developmental disorders*, 24(2), 129-154.

[Happé, 1994] Happé, F. G. (1994). Wechsler IQ profile and theory of mind in autism: A research note. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 35(8), 1461-1471.

[Happé, 1994] Happé, F. G. (1994). Annotation: current psychological theories of autism: the "theory of mind" account and rival theories. *Child Psychology & Psychiatry & Allied Disciplines*.

[Hiyadi, 2016] Hiyadi, H. (2016). *Reconnaissance 3D de gestes pour l'interaction homme-système* (Doctoral dissertation, Université Paris-Saclay; Université d'Evry-Val-d'Essonne; Université Mohammed V de Rabat).

[Huijnen, 2017] Huijnen, C. A. G. J., Lexis, M. A. S., & De Witte, L. P. (2017). Robots as new tools in therapy and education for children with autism. *International Journal of Neurorehabilitation*, 4(4), 1-4.

[Iacono, 2011] Iacono, I., Lehmann, H., Marti, P., Robins, B., & Dautenhahn, K. (2011, August). Robots as social mediators for children with Autism-A preliminary analysis comparing two different robotic platforms. In *2011 IEEE international conference on development and learning (ICDL)* (Vol. 2, pp. 1-6). IEEE.

[Joshi, 2015] Joshi, A., Kale, S., Chandel, S., & Pal, D. K. (2015). Likert scale: Explored and explained. *British journal of applied science & technology*, 7(4), 396.

[Jouen, 2017] Jouen, A. L., Narzisi, A., Xavier, J., Tilmont, E., Bodeau, N., Bono, V., ... & Cohen, D. (2017). GOLIAH (Gaming Open Library for Intervention in Autism at Home): a 6-

month single blind matched controlled exploratory study. *Child and Adolescent Psychiatry and Mental Health*, 11(1), 1-14.

[Kanner, 1943] Kanner, Leo. "Follow-up study of eleven autistic children originally reported in 1943." *Journal of autism and childhood schizophrenia* 1.2 (1971): 119-145.

[Landrigan, 2010] Landrigan, P. J. (2010). What causes autism? Exploring the environmental contribution. *Current opinion in pediatrics*, 22(2), 219-225.

[Lemaignan, 2018] Lemaignan, S., Edmunds, C. E., Senft, E., & Belpaeme, T. (2018). *The PInSoRo dataset: Supporting the data-driven study of child-child and child-robot social dynamics*. PloS one, 13(10), e0205999.

[Lord, 2005] Lord, C., Wagner, A., Rogers, S., Szatmari, P., Aman, M., Charman, T., ... & Yoder, P. (2005). Challenges in evaluating psychosocial interventions for autistic spectrum disorders. *Journal of autism and developmental disorders*, 35(6), 695-708.

[Lytridis, 2018] Lytridis, C., Vrochidou, E., Chatzistamatis, S., & Kaburlasos, V. (2018, June). Social engagement interaction games between children with Autism and humanoid robot NAO. In *The 13th international conference on soft computing models in industrial and environmental applications* (pp. 562-570). Springer, Cham.

[Matarić, 2007] Matarić, M. J., Eriksson, J., Feil-Seifer, D. J., & Winstein, C. J. (2007). Socially assistive robotics for post-stroke rehabilitation. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 4(1), 1-9.

[Matarić, 2016] Matarić, M. J., & Scassellati, B. (2016). Socially assistive robotics. *Springer handbook of robotics*, 1973-1994.

[Mazon, 2019] Mazon, C., Fage, C., & Sauzéon, H. (2019). Effectiveness and usability of technology-based interventions for children and adolescents with ASD: A systematic review of reliability, consistency, generalization and durability related to the effects of intervention. *Computers in Human Behavior*, 93, 235-251.

[Mkhinini, 2013] Mkhinini, M., & Horain, P. (2013, May). Reconnaissance de gestes: approches 2D & 3D. In *JETSAN 2013: Journées d'étude sur la TéléSanté* (pp. 1-6).

[Nadel, 2002] Nadel, J., & Potier, C. (2002). Imiter, imitez, il en restera toujours quelque chose: le statut développemental de l'imitation dans le cas d'autisme. *Enfance*, 54(1), 76-85.

[Nadel, 2005] Nadel, J. (2005). Planification et imitation de l'action chez des personnes bien portantes et des enfants souffrant d'autisme.

[Nadel, 2021] Nadel, J. (2021). *Imiter pour grandir-3e éd.: Développement du bébé et de l'enfant avec autisme*. Dunod.

[Pennisi, 2016] Pennisi, P., Tonacci, A., Tartarisco, G., Billeci, L., Ruta, L., Gangemi, S., & Pioggia, G. (2016). Autism and social robotics: A systematic review. *Autism Research*, 9(2), 165-183.

[Penny, 1995] Penny, N. H., Mueser, K. T., & Thomas North, C. (1995). The Allen Cognitive Level Test and social competence in adult psychiatric patients. *The American Journal of Occupational Therapy*, 49(5), 420-427.

[Pfister, 2013] Pfister, R., Dignath, D., Hommel, B., & Kunde, W. (2013). It Takes Two to Imitate: Anticipation and Imitation in Social Interaction. *Psychological Science*, 24(10), 2117–2121. <https://doi.org/10.1177/0956797613489139>

[Porayska-Pomsta, 2013] Porayska-Pomsta, K., Anderson, K., Bernardini, S., Guldberg, K., Smith, T., Kossivaki, L., ... & Lowe, I. (2013, November). Building an intelligent, authorable serious game for autistic children and their carers. In *International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology* (pp. 456-475). Springer, Cham.

[Ratajczak, 2011] Ratajczak, H. V. (2011). Theoretical aspects of autism: Causes—A review. *Journal of immunotoxicology*, 8(1), 68-79.

[Robins, 2004] Robins, B., Dickerson, P., Stribling, P., & Dautenhahn, K. (2004). Robot-mediated joint attention in children with autism: A case study in robot-human interaction. *Interaction studies*, 5(2), 161-198.

[Robins, 2005] Robins, B., Dautenhahn, K., Boekhorst, R. T., & Billard, A. (2005). Robotic assistants in therapy and education of children with autism: can a small humanoid robot help encourage social interaction skills?. *Universal access in the information society*, 4(2), 105-120.

[Robins, 2005] Robins, B., Dautenhahn, K., Nehaniv, C. L., Mirza, N. A., François, D., & Olsson, L. (2005, August). Sustaining interaction dynamics and engagement in dyadic child-robot interaction kinesics: Lessons learnt from an exploratory study. In *ROMAN 2005. IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2005*. (pp. 716-722). IEEE.

[Scarpa, 2012] Scarpa, O., François, M., Gobert, L., Bourger, P., Dall'Asta, A., Rabih, M., ... & Nadel, J. (2012). L'imitation au service de l'autisme: Une étude pilote. *Enfance*, 2012, 389-410.

[Scassellati, 2012] Scassellati, B., Admoni, H., & Mataric, M. (2012). Robots for use in autism research. *Annual review of biomedical engineering*, 14, 275-294.

[Scassellati, 2020] Scassellati, B., & Vázquez, M. (2020). The potential of socially assistive robots during infectious disease outbreaks. *Science Robotics*, 5(44), eabc9014.

[Schaal, 1999] Schaal, S. (1999). Is imitation learning the route to humanoid robots?. *Trends in cognitive sciences*, 3(6), 233-242.

[Schaal, 2003] Schaal, S., Ijspeert, A., & Billard, A. (2003). Computational approaches to motor learning by imitation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 358(1431), 537-547.

[Schadenberg, 2021] Schadenberg, B. R. (2021). *Robots for Autistic Children: Understanding and Facilitating Predictability for Engagement in Learning*. University of Twente. <https://doi.org/10.3990/1.9789036551649>

[Schindler, 1999] Schindler, V. P. (1999). Group effectiveness in improving social interaction skills. *Psychiatric Rehabilitation Journal*, 22(4), 349.

[Sokolova, 2017] Sokolova, E., Oerlemans, A. M., Rommelse, N. N., Groot, P., Hartman, C. A., Glennon, J. C., ... & Buitelaar, J. K. (2017). A causal and mediation analysis of the comorbidity between attention deficit hyperactivity disorder (ADHD) and autism spectrum disorder (ASD). *Journal of autism and developmental disorders*, 47(6), 1595-1604.

[Stern, 1995] Stern, D. N. (1995). Self/other differentiation in the domain of intimate socio-affective interaction: Some considerations. *ADVANCES IN PSYCHOLOGY-AMSTERDAM-*, 112, 419-430.

[Tanaka, 2017] Tanaka, H., Negoro, H., Iwasaka, H., & Nakamura, S. (2017). Embodied conversational agents for multimodal automated social skills training in people with autism spectrum disorders. *PloS one*, 12(8), e0182151.

[Tenenbaum, 2006] Tenenbaum, J.B., Griffiths, T.L., Kemp, C., 2006. Theory-based Bayesian models of inductive learning and reasoning. *Trends in Cognitive Sciences*, Special issue: Probabilistic models of cognition 10, 309–318. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2006.05.009>

[Winnykamen, 1990] Winnykamen, F. (1990). *Apprendre en imitant*. FeniXX.

[Winnykamen, 1990] Winnykamen, F., & Lafont, L. (1990). Place de l'imitation-modélisation parmi les modalités relationnelles d'acquisition: le cas des habiletés motrices. *Revue française de pédagogie*, 23-30.

ANNEXES

9 ANNEXES

9.1 ANNEXE 1 - Questionnaire vierge

QUESTIONNAIRE ADRESSÉ AUX ACCOMPAGNANTS D'ADOLESCENTS TSA NON VERBAUX

Merci d'entourer votre ou vos réponse(s) aux questions ci-dessous.

1. Depuis combien de temps accompagnez-vous des adolescents atteints de troubles du spectre autistique (TSA) et non verbaux ?
 - A. 3 à 6 mois
 - B. 6 à 12 mois
 - C. 1 à 3 ans
 - D. 4 à 6 ans
 - E. 7 ans ou plus

2. Quelles sont les deux difficultés que vous rencontrez le plus couramment dans le cadre de l'accompagnement de ces jeunes ?
 - A. Difficulté de communication
 - B. Difficulté d'interactions sociales
 - C. Difficulté liée aux comportements violents
 - D. Difficulté d'apprentissage (non-respect des règles de vie, etc...)
 - E. Autres (précisez SVP) :

3. Quels seraient selon vous les trois paramètres les plus importants à considérer dans la mesure du niveau des interactions sociales avec des adolescents atteints de TSA et non verbaux ?
 - A. Le contact visuel
 - B. L'orientation du corps ou de la tête (vers l'interlocuteur ou non)
 - C. Le contact physique
 - D. La réponse aux salutations ou à une invitation à jouer

E. Autres (précisez SVP) :

4. Pensez-vous qu'un robot d'assistance pourrait être utile dans l'amélioration des interactions sociales avec ces jeunes ?

A. Oui

B. Non

C. Je ne sais pas

Veillez expliquer pourquoi SVP :

5. En tant qu'accompagnant de jeune(s) atteint(s) de TSA, seriez-vous disposé(e) à être formé(e) pour interagir avec un petit robot dans le cadre de vos séances d'activités avec les jeunes ?

A. Oui

B. Non

6. Où pensez-vous que les séances devraient se dérouler ?

A. Toutes à domicile

B. Toutes en environnement médicalisé

C. Réparties entre les deux environnements

7. Quelle durée de séance recommanderiez-vous pour les activités à mener avec le robot social ?

A. 5 à 7 minutes

B. 8 à 10 minutes

C. 11 à 13 minutes

D. 14 à 16 minutes

8. Combien de séances par semaine recommanderiez-vous ?

- A. Une
- B. Deux
- C. Trois
- D. Quatre

9. Sur combien de temps pensez-vous que les séances de travail devraient s'étendre au minimum ?

- A. 3 à 6 semaines
- B. 7 à 9 semaines
- C. 3 à 5 mois
- D. 6 à 8 mois
- E. Au moins 9 mois

10. Merci d'indiquer vos commentaires, suggestions, préoccupations ci-dessous

9.2 ANNEXE 2 - Canevas de session expérimentale

Nom de la session expérimentale HRI/autisme :		
Lieu :	Date(s) ou période :	Individuelle ou Groupe
Durée :		Libre, structurée ou semi-structurée
Fréquence :		
Caractéristiques du groupe cible dont niveau de fonctionnement à entourer (haut, moyen, bas, niveaux multiples, niveau spécifique, non applicable) : <i>Veillez SVP décrire le participant principal</i>		
Nombre de participants :	Nom(s) du/des participant(s) et rôles :	
Objectifs : <ul style="list-style-type: none"> • Attention captée et maintenue • Suivi de consignes • Imitation ludique • Imitation dans les interactions sociales • Amélioration des routines sociales • Autres ? <p>.....</p> <div style="text-align: right; margin-top: 10px;"> <i>Note : dans la marge de gauche devant les objectifs, veuillez les numéroter à partir de 1 (le plus important ou premier à atteindre).</i> </div>		

.....
Références à la littérature :
Type de robot et rôle(s) : provocateur, renforçateur, formateur, médiateur, incitateur (<i>prompter</i>), diagnostiqueur, copain
Description synthétique de la méthode / du scénario :
Paramètres de mesure :

Notes/observations :

Ressenti général et leçons tirées :

9.3 ANNEXE 3 - Protocole de consentement

INPHB EDP, ESATIC & IMT Atlantique

Chercheur-e-s : Linda N. Vallée ; Mai Nguyen , Christophe Lohr ; Ioannis Kanellos ; Olivier Asseu

Lieu de collecte des données : CAMPSE, Abidjan

Nom du projet : FLORA

Madame, Monsieur,

Nous sollicitons votre consentement dans le cadre d'un projet de recherche relatif à l'interaction homme-machine dans le cadre d'un projet d'amélioration des interactions sociales avec les personnes autistes.

Déroulement

Vous avez participé à un test durant lequel vous avez été filmé.e en interaction avec un ordinateur, des accompagnants humains. Nous sollicitons votre autorisation d'exploiter de façon anonyme les données recueillies dans le cadre de ces travaux scientifiques et pour la promotion de ces travaux dans un cadre scientifique.

Consentement et Autorisation

Je soussigné.esuis informé.e que toutes les informations collectées dans le cadre de ce test seront strictement confidentielles et qu'aucune des données ne permettra de m'identifier (pas de gros plan, photos et films pris de profil...). Je serai désigné.e par un nom fictif afin de préserver mon anonymat.

Je suis informé.e que cette étude est conduite pour contribuer aux connaissances en sciences de l'éducation et sciences de l'informatique et qu'elle pourra être présentée en colloque ou dans un cadre de formation académique, en utilisant des photos et des extraits vidéos du dispositif, et que les résultats pourront être publiés.

Je suis informé.e que cette vidéo pourra être utilisée pour illustrer des cas d'usages sur un site web et pourra être diffusée comme illustration de ce type de travaux dans un cadre approprié (colloques, conférences, articles scientifiques).

Je suis aussi informé.e que je ne recevrai aucune gratification pour ma participation.

Nom, prénom.....

Date.....

Signature

9.4 ANNEXE 4 – Code de base du jeu d'imitation

```
#!/usr/bin/env python

'''

imigame.py
Authors: L. N. Vallée
//CopyPolicy: Released under the terms of the LGPLv2.1 or later, see LGPL.TXT

'''

# Modules à importer

import sys
import rospy
import cv2
from std_msgs.msg import *
from qt_robot_interface.srv import *
from qt_gesture_controller.srv import *
from qt_nuitrack_app.msg import *

# Procédure pour les phases de salutations et de pairing

    #For verbal participants, ask for name and store in variable to be used afterwards
    #For nonverbal participants, we could personalize the greetings with the name

def greetings_procedure():
    rospy.sleep(5)
    #behaviorTalkText("Bonjour Flora !")
    behaviorTalkText("Bonjour mon ami !")
    rospy.sleep(2)
    gesturePlay("QT/hi", 0) # Le robot effectue ici le geste de salutations

    behaviorTalkText("Je suis content de te voir !")
    rospy.sleep(1)
    behaviorTalkText ("Je m'appelle Cutie.")
    rospy.sleep(2)

    # Ici nous entamons le pairing

    behaviorTalkText("Mettons un peu de musique pour se détendre?")
    rospy.sleep(2)

    # waiting for connection establishment
    wtime_begin = rospy.get_time()
    while (audioPlay_pub.get_num_connections() == 0) :
        rospy.loginfo("waiting for publisher connection")
        if rospy.get_time() - wtime_begin > 5.0:
            rospy.logerr("Timeout while waiting for publisher connection!")
            sys.exit()
```

```

    rospy.sleep(1)

# Ici nous choisissons la chanson qui sera lancée :

#audioPlay_pub.publish("QT/5LittleBunnies")
audioPlay_pub.publish("QT/minuitVC")
#audioPlay(stop)

# Ici le robot annonce le jeu d'imitation

rospy.sleep(2)
behaviorTalkText("Tu sais, j'aimerais jouer avec toi.")
rospy.sleep(1)

# Ici le robot affiche une émotion joyeuse, en clignant des yeux
emotionShow("QT/happy_blinking")

# Phase d'imitation

# Documentation
# Location of gesture files transferred from QTRP : /home/qtrobot/robot/data/gestures/
# Exemple : hi.xml pour le geste WAVING

# Nous commençons par définir une variable globale appelée « etat »
etat = 0

def gesture_callback(evt):
    global etat
    # rospy.loginfo(gestures)

    for k in evt.gestures:
        #print(k)
        if k.name == "WAVING" :
            etat = 1

def gesture_callback_2(evt):
    global etat
    # rospy.loginfo(gestures)

    for k in evt.gestures:
        print(k)
        if k.name == "SWIPE RIGHT" :
            etat = 1
        else:
            etat=2

# Procédure de reconnaissance de gestes

def gesture_reco_proc():

    behaviorTalkText("Mon ami, jouons ensemble!")

```

```

rospy.sleep(1)
behaviorTalkText("Regarde ce geste")
gesturePlay("QT/waving", 0)

# Imitation induite, ou provoquée
behaviorTalkText("Maintenant, essaie de faire comme moi !")

# Ici nous « souscrivons au fil d'informations » (topic) des gestes effectués par le
#participant :
gesture_sub = rospy.Subscriber('/qt_nuitrack_app/gestures', Gestures, gesture_callback)
#rospy.sleep(7)

# Ici nous initialisons la variable locale i qui déterminera le nombre de tentatives accordées

i=0

# La boucle ci-dessous signifie : « Tant que l'on ne voit pas le geste attendu au cours des
#sept secondes accordées au participant, on l'encourage à réessayer et on incrémente la
#valeur de i (pas = 1)

while (etat !=1):
    print(etat)
    rospy.sleep(7)
    #behaviorTalkText("Flora, essaie encore si tu veux !")
    behaviorTalkText("Allez mon ami, essaie encore si tu veux !")

    i=i+1

# Au bout de trois tentatives infructueuses, on sort de la boucle

if i == 3:
    break

# Lorsque le geste consigne effectué par le robot est bien imité par le participant
(condition), on exécute la partie ci-dessous, en félicitant le participant :

if (etat==1):
    #behaviorTalkText("Bravo Flora ! Tu as réussi !")
    behaviorTalkText("Bravo mon ami ! Tu as réussi !")

#Sinon, le robot lui dit ce qui suit.

else :
    behaviorTalkText("Bon, ce n'est pas grave. Nous essaierons une autre fois !")

# Phase de clôture

# Le robot remercie ensuite le participant.
# On peut s'arrêter là, ou l'inviter à poursuivre, avec un autre geste à imiter.
# Selon le niveau du participant, la réponse pourra ou non venir de lui.

```

```

behaviorTalkText("Merci d'avoir joué un peu avec moi."
# behaviorTalkText("Merci d'avoir joué un peu avec moi. On continue?")

# Le robot peut envoyer un bisou au participant, ou effectuer le signe d'au revoir
#gesturePlay("QT/kiss", 0)
#gesturePlay("QT/bye-bye", 0)

# Les expressions faciales du robot doivent toujours être agréables. Il sourit en quasi
#permanence, ce qui s'avérerait difficile pour un être humain
emotionShow("QT/happy_blinking")

# La procédure principale
# où l'on crée les services utiles
# et où l'on appelle les procédures précédemment définies

if __name__ == '__main__':

    rospy.init_node('imigame')

    # Here we create some service clients
    #audioPlay = rospy.ServiceProxy('/qt_robot/audio/play', audio_play)
    audioPlay_pub = rospy.Publisher('/qt_robot/audio/play', String, queue_size=10)
    gesturePlay = rospy.ServiceProxy('/qt_robot/gesture/play', gesture_play)
    emotionShow = rospy.ServiceProxy('/qt_robot/emotion/show', emotion_show)
    behaviorTalkText = rospy.ServiceProxy('/qt_robot/behavior/talkText', behavior_talk_text)

    # Ici on appelle les procédures précédentes et on traite les exceptions

    rospy.loginfo("ready...")
    try:
        greetings_procedure()
        gesture_reco_proc()
        #gesture_reco_proc_2()

    except rospy.ROSInterruptException:
        pass

```

9.5 ANNEXE 5 – Exemples de questionnaires complétés

9.5.1 Questionnaire de la Fondatrice Directrice du CAMPSE (Abidjan)

Merci d'entourer votre ou vos réponse(s) aux questions ci-dessous.

1. Depuis combien de temps accompagnez-vous des adolescents atteints de troubles du spectre autistique (TSA) et non verbaux ?

- F. 3 à 6 mois
- G. 6 à 12 mois
- H. 1 à 3 ans
- I. 4 à 6 ans
- J. 7 ans ou plus

2. Quelles sont les deux difficultés que vous rencontrez le plus couramment dans le cadre de l'accompagnement de ces jeunes ?

- F. Difficulté de communication
- G. Difficulté d'interactions sociales
- H. Difficulté liée aux comportements violents
- I. Difficulté d'apprentissage (non-respect des règles de vie, etc...)
- J. Autres (précisez SVP) :

3. Quels seraient selon vous les trois paramètres les plus importants à considérer dans la mesure du niveau des interactions sociales avec des adolescents atteints de TSA et non verbaux ?

- F. Le contact visuel
- G. L'orientation du corps ou de la tête (vers l'interlocuteur ou non)
- H. Le contact physique
- I. La réponse aux salutations ou à une invitation à jouer
- J. Autres (précisez SVP) :

4. Pensez-vous qu'un robot d'assistance pourrait être utile dans l'amélioration des interactions sociales avec ces jeunes ?

- D. Oui
- E. Non
- F. Je ne sais pas

Veillez expliquer pourquoi SVP : c'est ludique. L'apprentissage ludique est conseillé.

5. En tant qu'accompagnant de jeune(s) atteint(s) de TSA, seriez-vous disposé(e) à être formé(e) pour interagir avec un petit robot dans le cadre de vos séances d'activités avec les jeunes ?

C. Oui

D. Non

6. Où pensez-vous que les séances devraient se dérouler ?

D. Toutes à domicile

E. Toutes en environnement médicalisé

F. Réparties entre les deux environnements

7. Quelle durée de séance recommanderiez-vous pour les activités à mener avec le robot social ?

E. 5 à 7 minutes

F. 8 à 10 minutes

G. 11 à 13 minutes

H. 14 à 16 minutes

8. Combien de séances par semaine recommanderiez-vous ?

E. Une

F. Deux

G. Trois

H. Quatre

9. Sur combien de temps pensez-vous que les séances de travail devraient s'étendre au minimum ?

F. 3 à 6 semaines

G. 7 à 9 semaines

H. 3 à 5 mois

I. 6 à 8 mois

J. Au moins 9 mois

10. Merci d'indiquer vos commentaires, suggestions, préoccupations ci-dessous
J'espère que vous avez pensé à l'environnement socio-culturel de l'Afrique.

9.5.2 Questionnaire d'un Psychologue clinicien spécialisé en troubles neurodéveloppementaux

1. Depuis combien de temps accompagnez-vous des adolescents atteints de troubles du spectre autistique (TSA) et non verbaux ?

- K. 3 à 6 mois
- L. 6 à 12 mois
- M. 1 à 3 ans
- N. 4 à 6 ans**
- O. 7 ans ou plus

2. Quelles sont les deux difficultés que vous rencontrez le plus couramment dans le cadre de l'accompagnement de ces jeunes ?

- K. Difficulté de communication**
- L. Difficulté d'interactions sociales
- M. Difficulté liée aux comportements violents**
- N. Difficulté d'apprentissage (non-respect des règles de vie, etc...)
- O. Autres (précisez SVP) :

3. Quels seraient selon vous les trois paramètres les plus importants à considérer dans la mesure du niveau des interactions sociales avec des adolescents atteints de TSA et non verbaux ?

- K. Le contact visuel
- L. L'orientation du corps ou de la tête (vers l'interlocuteur ou non)**
- M. Le contact physique
- N. La réponse aux salutations ou à une invitation à jouer**
- O. Autres (précisez SVP) : **l'initiation spontanée d'une demande d'interaction**

4. Pensez-vous qu'un robot d'assistance pourrait être utile dans l'amélioration des interactions sociales avec ces jeunes ?

- G. Oui**
- H. Non
- I. Je ne sais pas

Veillez expliquer pourquoi SVP : méta-analyse récente prometteuse (cf. Salimi et al., 2021)

5. En tant qu'accompagnant de jeune(s) atteint(s) de TSA, seriez-vous disposé(e) à être formé(e) pour interagir avec un petit robot dans le cadre de vos séances d'activités avec les jeunes ?

E. Oui

F. Non

6. Où pensez-vous que les séances devraient se dérouler ?

G. Toutes à domicile

H. Toutes en environnement médicalisé

I. Réparties entre les deux environnements

7. Quelle durée de séance recommanderiez-vous pour les activités à mener avec le robot social ?

I. 5 à 7 minutes

J. 8 à 10 minutes

K. 11 à 13 minutes

L. 14 à 16 minutes

8. Combien de séances par semaine recommanderiez-vous ?

I. Une

J. Deux

K. Trois

L. Quatre

9. Sur combien de temps pensez-vous que les séances de travail devraient s'étendre au minimum ?

K. 3 à 6 semaines

L. 7 à 9 semaines

M. 3 à 5 mois

N. 6 à 8 mois

O. Au moins 9 mois

10. Merci d'indiquer vos commentaires, suggestions, préoccupations ci-dessous

9.5.3 Questionnaire d'une Maman d'adolescent autiste

1. Depuis combien de temps accompagnez-vous des adolescents atteints de troubles du spectre autistique (TSA) et non verbaux ?

- A. 3 à 6 mois
- B. 6 à 12 mois
- C. 1 à 3 ans
- D. 4 à 6 ans
- E. 7 ans ou plus

2. Quelles sont les deux difficultés que vous rencontrez le plus couramment dans le cadre de l'accompagnement de ces jeunes ?

- A. Difficulté de communication
- B. Difficulté d'interactions sociales
- C. Difficulté liée aux comportements violents
- D. Difficulté d'apprentissage (non-respect des règles de vie, etc...)
- E. Autres (précisez SVP) :

3. Quels seraient selon vous les trois paramètres les plus importants à considérer dans la mesure du niveau des interactions sociales avec des adolescents atteints de TSA et non verbaux ?

- A. Le contact visuel
- B. L'orientation du corps ou de la tête (vers l'interlocuteur ou non)
- C. Le contact physique
- D. La réponse aux salutations ou à une invitation à jouer
- E. Autres (précisez SVP) :

4. Pensez-vous qu'un robot d'assistance pourrait être utile dans l'amélioration des interactions sociales avec ces jeunes ?

- A. Oui
- B. Non
- C. Je ne sais pas

Veillez expliquer pourquoi SVP : le robot peut favoriser l'émergence de certains comportements nécessaire à la communication. Il peut aider à développer leurs interactions sociales et à atteindre des objectifs éducatifs précis : regarder dans les yeux, prendre son tour de parole.

5. En tant qu'accompagnant de jeune(s) atteint(s) de TSA, seriez-vous disposé(e) à être formé(e) pour interagir avec un petit robot dans le cadre de vos séances d'activités avec les jeunes ?
- A. Oui
 B. Non
6. Où pensez-vous que les séances devraient se dérouler ?
- A. Toutes à domicile
- B. Toutes en environnement médicalisé
- C. Réparties entre les deux environnements
7. Quelle durée de séance recommanderiez-vous pour les activités à mener avec le robot social ?
- A. 5 à 7 minutes
- B. 8 à 10 minutes
- C. 11 à 13 minutes
- D. 14 à 16 minutes
8. Combien de séances par semaine recommanderiez-vous ?
- A. Une
- B. Deux
- C. Trois
- D. Quatre
9. Sur combien de temps pensez-vous que les séances de travail devraient s'étendre au minimum ?
- A. 3 à 6 semaines
- B. 7 à 9 semaines
- C. 3 à 5 mois
- D. 6 à 8 mois
- E. Au moins 9 mois
10. Merci d'indiquer vos commentaires, suggestions, préoccupations ci-dessous

9.6 ANNEXE 6 – Retour de la mère du participant K

Extraits de conversation avec Madame Cherrier en juin 2021 :

« Antoine était très enthousiaste à l'idée de rencontrer le robot. Il n'a cessé d'en parler pendant les jours qui ont précédé la première séance. »

« À la suite de cette première séance, il a raconté à son père et à ses deux frères, tout ce qui s'était passé, et a demandé quand aurait lieu la séance suivante. »

« Lors de la deuxième journée, Antoine a pu rencontrer un autre robot en plus de QT, le Pepper. Il l'a beaucoup apprécié car Pepper est capable de tenir de petites conversations, et aussi parce qu'il tourne la tête vers son interlocuteur. Antoine a dit trouver QTrobot plus mignon mais préférer Pepper parce qu'il est plus intéressant. »

Email envoyé par Madame Cherrier en septembre 2021 :

« Tout d'abord, j'espère que tu vas bien et que William a bien repris le chemin de l'école.

Alors avant la première séance, Antoine avait hâte d'aller voir le robot. Je lui avait montré la photo et il me posait des questions auxquelles je ne savais pas répondre. Il n'avait aucune angoisse de venir dans un lieu qu'il ne connaissait pas.

Arrivé devant le robot, comme devant toute situation nouvelle, il n'a rien dit et a observé longuement son fonctionnement.

La technique est très importante pour lui. Il a dit : il y a 2 caméras et un détecteur de mouvement !

Il n'avait pas forcément envie de parler avec QT et en plus il ne comprenait pas ce que QT voulait quand il lui disait : joue avec moi.

Par compte il était enchanté en sortant et il en a parlé à beaucoup de personnes.

Il m'a dit qu'il ne pouvait danser devant quelqu'un et qu'il n'arrivait pas à faire le mouvement du bras de QT pour dire bonjour.

A chaque fois, il est retourné avec grand plaisir.

La fois où Eliott est venu et qu'il a dansé, Antoine a été frustré. Normalement il essaiera de danser la prochaine fois.

C'est à la séance avec Pepper et QT, qu'Antoine a commencé à prendre plaisir à discuter avec les robots.

Antoine préfère Pepper car il a une forme plus humaine et qu'il tourne la tête dans la direction d'où vient la voix. Une fois à l'école, en maternelle il avait dit à la maîtresse qui lui parlait en faisant du découpage : regarde moi quand je te parle ! Alors que lui était à cette époque , incapable de parler en regardant . Il préfère Pepper qui ne montre aucune émotion sur son visage mais qui se tourne quand il lui parle.

Eliott qui est très sensible aux traits de caractère du visage préfère QT car il voit tout de

suite l'émotion qu'il dégage. C'est très difficile pour Antoine. Il commence juste à savoir si quelqu'un est content ou pas content.

Voilà j'espère que j'ai été à peu près clair !
N'hésite pas si tu as besoin d'autres choses.

Les garçons attendent ton retour 

Bonne soirée

Patricia »

9.7 ANNEXE 7 – Autres photos des séances



Figure 41 – Qrobot with participant J and the human help



Figure 42 - QTrobot with Participants J and K and the human help

9.8 ANNEXE 8 - Premier colloque ivoirien sur l'autisme

Le Programme National de Santé Mentale
en collaboration avec Le Centre Marguerite Té Bonlé de l'INSP,
l'Association Autismes Côte d'Ivoire
et le Collège des Enseignants de Psychiatrie
organisent

1er colloque ivoirien sur l'AUTISME

" ACTUALITES SUR L'AUTISME ET DU
HANDICAP EN COTE D'IVOIRE : Famille, Soins
et Institutions en période de Covid19 "

Président d'honneur : Pr Delafosse Roger Charles-Joseph

SOUS-THEMES :

- Soins, Famille et Culture
- Pratiques institutionnelles, aspects médico-psycho-sociaux et crise sanitaire

APPEL A COMMUNICATION

Structure IMRD
Times New Roman, 11
250 mots, 5 mots-clé
Version électronique (Word)

INSCRIPTION

- Professionnels : 20.000 frs
- Étudiants, Paramédicaux, Travailleurs sociaux, Enseignants : 10.000frs
- Parents : 5.000frs

10-11 MAI 2022
08.30-16.30

Institut National de Santé Publique (INSP)
Adjamé-Camp Gallieni

Président Scientifique
Dr DAGOU Denis Koménan
Maître de conférences
Psychologie Clinique et Psychopathologie
Président du CNPsy-CI

Invités
Dr Dieye Ndiaye (Sénégal)
Rosine Duquesne (Autisme Rwanda)

Date limite de soumission
21 avril 2022

+225. 07 00 66 93 55 / 05 76 29 05 87 / 07 58 65 51 99 colloquepsm@gmail.com

Made with PosterMyWall.com

ASSOCIATION AUTISMES CÔTE D'IVOIRE

CNPsy-CI

Figure 43 - Support de communication du 1er colloque ivoirien sur l'autisme

NB : du fait de la tenue à Abidjan, du 9 au 20 mai 2022, de la 15^{ème} conférence des Parties de la Convention des Nations Unies pour la lutte contre la désertification, ce colloque a finalement été reporté à une date ultérieure. La communication que nous avons soumise a été acceptée.