



Disponible en ligne sur

ScienceDirect
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France

EM|consulte
www.em-consulte.com



Communication

Autisme, jeux sérieux et robotique : réalité tangible ou abus de langage ?



Autism, serious games and robotics: Tangible reality or abuse of language?

David Cohen^{a,*}, Charline Grossard^{a,b}, Ouriel Grynszpan^b, Salvatore Anzalone^c,
Sofiane Boucenna^d, Jean Xavier^{a,b}, Mohamed Chetouani^b, Laurence Chaby^{b,e}

^a Service de psychiatrie de l'enfant et de l'adolescent, GHU Pitié-Salpêtrière Charles-Foix, 47, boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris, France

^b CNRS UMR 7222, institut des systèmes intelligents et robotiques (ISIR), université Pierre-et-Marie-Curie, 75005 Paris, France

^c Laboratoire CHART-THIM (EA4004), département ingénierie – cognition – handicap, université Paris 8, 93526 Saint-Denis, France

^d CNRS UMR 8051, équipes traitement de l'information et systèmes (ETIS), université de Cergy-Pontoise, 95014 Cergy, France

^e Institut de psychologie, université Paris Descartes, Sorbonne Paris Cité, 92100 Boulogne-Billancourt, France

INFO ARTICLE

Historique de l'article :
Disponible sur Internet le 11 avril 2017

Mots clés :
Autisme
Enfant
Entraînement aux habiletés sociales
Jeux sérieux
Robot
Technologies de l'information et de la communication
Trouble du spectre autistique

Keywords:
Autism
Autism spectrum disorder
Child
Information and communication technologies
Robotics
Serious games
Social skills training

RÉSUMÉ

Le nombre d'études sur l'utilisation des technologies de l'information, de la communication et de la robotique au service des enfants autistes a progressé rapidement au cours des 15 dernières années. Nous détaillons les espoirs, mais aussi les écueils et les verrous technologiques des deux domaines les plus dynamiques, à savoir : (1) la réalisation de jeux sérieux destinés à entraîner des habiletés spécifiques (reconnaissance des émotions, interactions sociales) ; (2) les interactions avec des robots. Nous prendrons plus particulièrement deux exemples à partir de projets auxquels nous collaborons ou avons directement collaboré, JeMiMe pour les jeux sérieux, et Michelangelo pour la robotique. Nous concluons que si nous sommes convaincus de l'impact potentiel de ces méthodes dans la prise en charge des enfants autistes, les limites sont encore importantes et la validité clinique très limitée.

© 2017 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

ABSTRACT

The number of studies focusing on the use of information technology and robotics for individuals with autism has been rising steeply over the last 15 years. Here, we briefly summarize the hope, but also the issues, of 2 domains we consider the most exciting: (1) the computation of serious game aiming at training specific skills (emotion recognition, social interaction); (2) interaction with robotic platforms. We will detail two projects in which we worked as partners, JeMiMe for serious games, and Michelangelo for human-robot interaction. We conclude that the potential benefit of the use of information technology and robotics for individuals with autism is enormous given what was achieved in less than 15 years. However, limitations are numerous and clinical validation still lacking.

© 2017 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

1. Introduction

Les Troubles du spectre autistique (TSA) sont des troubles neurodéveloppementaux qui se caractérisent, entre autres, par des difficultés dans les interactions sociales et des intérêts limités et stéréotypés. Les patients peuvent également présenter de nom-

breux déficits cognitifs associés concernant le langage oral [13], les capacités attentionnelles [38], ou concernant la compréhension des émotions d'autrui et la production d'expressions en accord avec les émotions ressenties [29,40]. Ces symptômes retentissent sur l'intégration des personnes avec TSA à l'école, dans le monde professionnel et dans la société de façon plus générale. Aider les personnes avec TSA à développer leurs habiletés sociales est donc un enjeu important dans leur prise en charge.

Les technologies de l'information et de la communication ont profondément transformé la manière d'aborder la psychopathologie,

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : davcoh55@gmail.com (D. Cohen).

en particulier en définissant un nouveau champ d'intérêt scientifique appelé « traitement du signal social » [10]. Dans ce domaine, il s'agit d'analyser de manière automatisée les comportements humains, les intentions, l'engagement social, la prosodie, etc., et de s'aider de modélisations numériques pour modéliser non seulement le comportement d'un individu, mais aussi de plusieurs individus en interaction. Dans le champ des interactions précoces mère-bébé, des chercheurs de l'équipe Interaction de l'institut des systèmes intelligents et de robotique (ISIR ; http://www.isir.upmc.fr/index.php?op=view_equipe&lang=fr&id=2&pageid=1096) ont par exemple montré l'importance de la dynamique motrice lors des interactions enfant-bébé modulées par l'ocytocine [41]. Ils ont également montré comment la reconstruction vidéo 3D de la scène interactive pouvait permettre d'extraire toute une série de signaux comportementaux moteurs, associés à la qualité de l'interaction, et permettant de distinguer des mères négligentes de mères bien portantes avec leur bébé [28]. En collaborant avec l'équipe de Pise, ils ont également pu montrer en exploitant des films familiaux comment la dynamique synchrone des interactions parent-bébé et la prosodie utilisée, permettait de distinguer bébés à devenir autistique de bébés contrôles normaux ou de bébé avec déficience intellectuelle (sans troubles autistiques) [9,33].

Ces dernières années, de nombreux chercheurs se sont intéressés aux technologies numériques dans la prise en charge des patients avec TSA (voir pour revue, Durkin, 2010) [15]. Certaines études semblent indiquer que les supports numériques permettraient d'améliorer l'intérêt des enfants avec TSA, plus encore que chez les enfants typiques [2]. De plus, ces supports ont l'avantage de présenter les informations de manière séquentielle : le déroulé est prévisible et donc rassurant [27,31]. Enfin, l'outil numérique est un support permettant de recréer facilement des situations de vie réelle et ainsi fournit au thérapeute de nombreuses situations de travail [25]. Quelques revues récentes se sont intéressées à l'efficacité de ces nouvelles approches basées sur les nouvelles technologies de l'information et de la communication (TIC) pour améliorer certaines compétences ciblées par les interventions [23]. Celles-ci semblent indiquer que ce type d'intervention est prometteur auprès d'un public avec TSA. Parmi les TIC, on distingue trois domaines principaux :

- les applications, qui sont des programmes pour petits systèmes (téléphone, tablette) dont l'objectif porte sur un facilitateur de la vie quotidienne ;
- les *serious games* ou jeux sérieux, que l'on peut décrire comme des jeux sur supports numériques ayant une visée éducative allant au-delà du divertissement [32]. Ceux-ci existent sur des supports multiples : ordinateurs, tablettes, etc. ;
- enfin, les robots.

Nous proposons, dans cet article, de brièvement présenter un panorama des recherches récentes dans le domaine des TICs et de l'autisme. Nous avons volontairement laissé de côté la question des applications car il s'agit le plus souvent de recherches appliquées. Nous nous concentrerons sur les deux domaines que sont les *serious games* qui comprennent souvent des avatars et la robotique. À chaque fois, nous présenterons brièvement des travaux de notre équipe ou en cours de développement. Enfin, nous terminerons en présentant un paradigme nouveau, celui de la robotique développementale.

2. Les avatars et les jeux sérieux

2.1. Généralités

Lorsque l'on interroge les bases de données internationales de recherche, on constate depuis 2006 une augmentation

exponentielle des recherches concernant les nouvelles technologies et les apprentissages dans les TSA [20]. Du point de vue des potentiels de l'informatique et de l'utilisation des avatars avec des patients autistes, on relève dans les avantages supposés leur caractère rassurant, engageant, à la fois structuré et flexible ; la possibilité d'offrir des stimulations riches et multi-sensorielles ; la possibilité de simuler la réalité dans des situations de contextes sociaux variés ; et enfin la possibilité de travailler sur les expressions émotionnelles. Les problèmes pressentis sont ceux d'une utilisation excessive que l'on connaît chez l'ensemble des enfants et adolescents normaux ; et lorsqu'il y a des progrès dans le cadre d'un jeu, la difficulté à généraliser ces progrès en situation plus naturelle.

Lorsque l'on regarde de manière un peu transversale les compétences visées par les jeux sérieux développés dans le champ des TSA, on peut distinguer deux grands groupes, ceux travaillant les compétences sociales et émotionnelles, d'une part, et ceux travaillant les compétences neurocognitives et fonctionnelles plus ciblées, d'autre part [19]. La Fig. 1 présente quelques exemples de ces différents jeux sérieux [17,18,22,36,39,42].

Notre équipe travaille dans le cadre d'un consortium avec l'équipe du CoBTeK à Nice (<http://unice.fr/recherche/laboratoires/cobtek>) sur un nouveau jeu sérieux, « JeMimE », qui devrait être la nouvelle génération de JeStiMuLE, un jeu déjà développé et validé [36]. Avant de présenter le travail en cours, il nous faut résumer la littérature sur les jeux sérieux ayant pour objectif de travailler les aptitudes sociales des personnes TSA.

2.2. Les jeux existants

Parmi ces jeux, nous avons recensé dans une revue détaillée [20] 16 jeux sérieux visant à améliorer la compréhension et l'expression des émotions chez les personnes avec TSA. La plupart de ces jeux cherchent uniquement à travailler la reconnaissance des émotions. Ceux-ci s'appuient sur des supports comme des photos, des dessins, des enregistrements audio, des vidéos, des personnages 3D. Cependant, bien que la reconnaissance des émotions soit multimodale par nature, la moitié des jeux ne proposent qu'un apprentissage sur support fixe (dessins, photographies...) et unimodal (le plus souvent visuel). Le support audio n'est que rarement proposé et seul un jeu s'intéresse à la posture corporelle comme indice de l'émotion ressentie. En revanche, la plupart de ces jeux proposent de travailler la reconnaissance des émotions en contexte. Seuls quatre jeux (LifelsGame, CopyMe, SmileMaze, le *serious game* de Park et al.) proposent de travailler la production des émotions [8,16,32,37]. Parmi eux, seul le jeu LifelsGame propose un support non fixe (avatar 3D) [32]. Il incite également à travailler la production émotionnelle uniquement grâce au contexte dans lequel se passe la scène (le joueur est amené à produire une expression faciale à partir d'un contexte mais sans le modèle d'un avatar).

Quinze autres jeux sérieux ont pour objet d'améliorer les habiletés sociales au plan plus général [20]. La moitié d'entre eux se focalisent sur des aptitudes importantes pour la collaboration deux à deux (négociation, tour de parole, planification à deux, etc.) et cherchent à contraindre la collaboration au cours du jeu par l'obligation de passer par des étapes à deux pour progresser dans le jeu. GOLIAH, décrit plus bas, est un jeu sérieux basé sur ce principe, cherchant à stimuler imitation et attention conjointe [4]. Quant aux autres jeux sérieux, ils proposent un entraînement en situation de monde virtuel à des situations d'interactions sociales spécifiques (aller au café, participer à un anniversaire, etc.).

Il ressort de ce travail de revue de nombreux biais qui méritent d'être soulignés. Concernant la validation clinique, plusieurs jeux n'ont même jamais été proposés à des patients avec TSA et certains

A: Compétences sociales et émotionnelles



Golan & Baron-Cohen, *Dev Psychopathol*, 2006

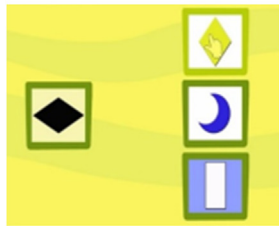


Golan et al., *J Autism Dev Disord*, 2010

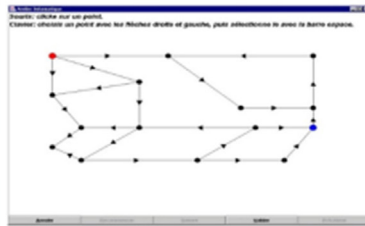


Serret et al., *Molecular Autism*, 2014

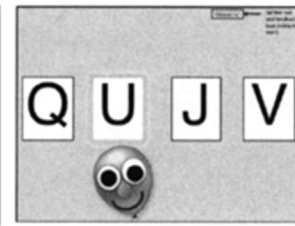
B: Compétences neurocognitives et fonctionnelles



Whalen et al., *Autism*, 2010



Grynszpan, Martin, & Nadel, *Interact Stud*, 2007



Travers et al., *Educ Train Autism Dev Disab*, 2011

Fig. 1. Exemples de jeux sérieux pour enfants TSA visant les compétences sociales et émotionnelles (A) et des compétences plus focalisées (B).

n'ont testé que l'utilisabilité du jeu, sans réelle évaluation des bénéfices pour les patients [20]. Dans les études d'efficacité, la taille des échantillons est souvent trop restreinte et peu d'études ont inclus un groupe contrôle. Quant aux effets cliniques, plusieurs jeux démontrent que les patients avec TSA présentent de meilleures habiletés sociales après l'entraînement, mais très peu d'études montrent que ces résultats sont généralisables à la vie quotidienne. En termes de public cible, la majorité des jeux sérieux nécessitent *a minima* de bonnes capacités de lecture et ne sont destinés qu'à des patients avec un haut niveau de fonctionnement. Ils ne sont donc pas accessibles pour de nombreux patients TSA qui présentent une déficience intellectuelle associée [20].

Malgré ces limites, l'utilisation des jeux sérieux semble pouvoir offrir de réelles opportunités pour travailler auprès des patients avec TSA. Une récente méta-analyse, se concentrant sur les remédiations basées sur les nouvelles technologies qui ont été testées auprès de patients TSA indépendamment de la cible thérapeutique mais dans des études de bonne qualité d'un point de vue méthodologique (*n* d'études = 14), montre que ce type de prise en charge est efficace [23].

2.3. JeMimE, un projet en cours

JeStiMulE est un jeu sérieux visant à travailler la reconnaissance de neuf émotions à travers des expressions faciales, mais également les gestes et la posture. Le jeu s'adresse à des enfants et adolescents avec TSA, quel que soit leur niveau de fonctionnement cognitif [36]. Il a été validé dans une étude clinique de bonne qualité. Il existe deux phases, une phase d'apprentissage ayant pour but d'apprendre aux enfants à associer une expression faciale, une expression vocale, une posture et des gestes à une émotion. Et une phase de jeu dans laquelle le joueur est immergé dans un environnement 3D et pendant laquelle il assiste à des scénarios auxquels il doit associer une émotion. L'étude clinique a montré que les enfants progressaient à l'usage du jeu et que certains de ces progrès pouvaient être généralisables hors contexte du jeu. Néanmoins, pendant le jeu, les enfants ne reçoivent pas de feedback sur la qualité de leurs réponses, notamment lors des moments d'imitation, ni sur la qualité de leur production émotionnelle au plan des mouvements faciaux ou de la prosodie. L'objectif du

nouveau jeu sérieux sur lequel nous collaborons, JeMimE, est justement de travailler la production émotionnelle uni- et bi-modale en contexte social. Le principal verrou technologique sur lequel nous travaillons avec les ingénieurs est la programmation d'un algorithme de reconnaissance émotionnelle capable de donner en temps réel un feedback au joueur. Cet algorithme sera développé suivant les principes d'apprentissage machine et devrait montrer une rapidité d'analyse suffisante pour pouvoir donner un feedback en temps réel [21].

3. Robotique et autisme : des résultats pour l'instant contrastés

3.1. Généralités

Dans le champ de l'autisme, la robotique est mise à contribution depuis plus de dix ans [3,11,35]. Les Fig. 2 et 3 présentent les principaux robots déjà utilisés en interaction avec des enfants TSA [14,24]. Pour comprendre la littérature des interactions robots-enfants TSA, il est important de garder en perspective les caractéristiques des robots, mais également pourquoi le robot a été mis en interaction et dans quel but.

Pour ce qui concerne les caractéristiques des robots (Fig. 2 et 3), plusieurs domaines peuvent être distingués. Tout d'abord, l'apparence du robot lui-même en termes d'attractivité visuelle, de taille, de réalisme, sachant que dans la robotique on distingue les robots anthropomorphes (exemple : NAO), biomécaniques (exemple : IROMEC) et non-anthropomorphes (exemple : KEE-PON). Il est important aussi de prendre en compte les fonctionnalités du robot en termes de capacité de choix ou de contrôle, de déplacement, de possibilité d'offrir des récompenses sensorielles, mais également de qualités d'engagement spontané lors des interactions enfant-robot [14,24]. Toujours dans les caractéristiques des robots, on tiendra compte des obligations de sécurité puisqu'il s'agit d'interactions avec des enfants et que certains robots peuvent être potentiellement dangereux ou d'un poids non négligeable. On doit tenir compte aussi des capacités d'autonomie de la machine et de ses capacités de modularité ou d'adaptabilité [14,24].

Quant aux raisons qui ont conduit les chercheurs à utiliser des robots avec des enfants autistes, on peut retenir d'après la

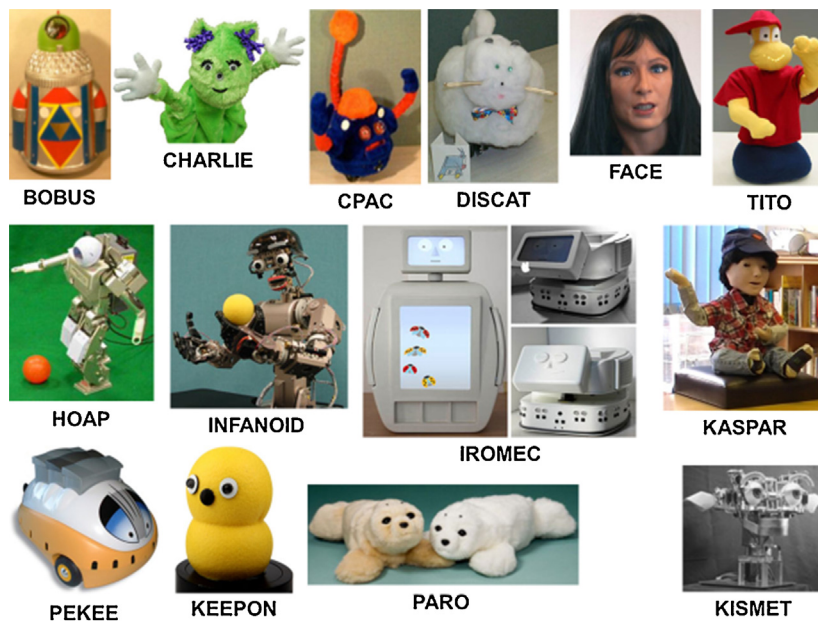


Fig. 2. Principaux robots déjà utilisés en interaction avec des enfants autistes (1).

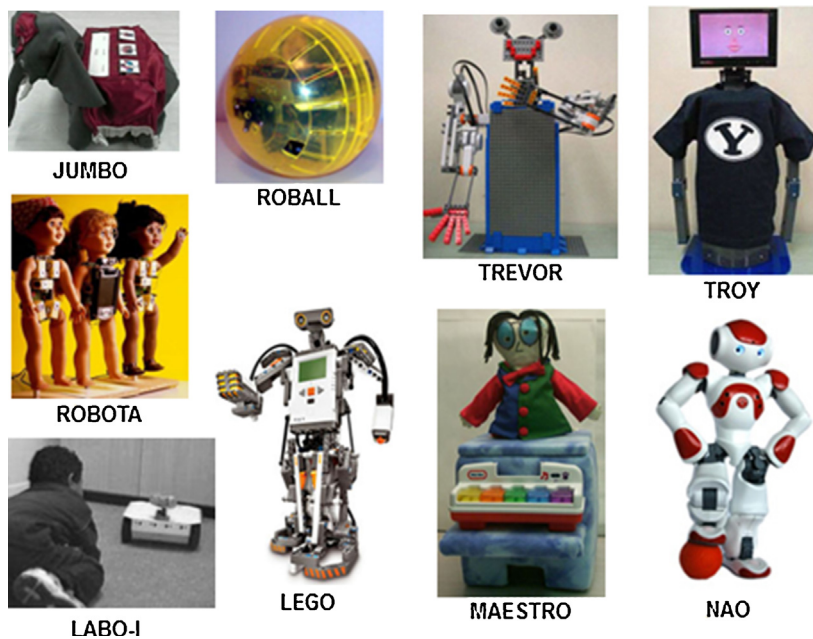


Fig. 3. Principaux robots déjà utilisés en interaction avec des enfants autistes (2).

littérature : la perspective de provoquer un comportement cible comme un regard, une imitation, un comportement d'attention conjointe, un tour de parole, une expression émotionnelle, une initiation des interactions, que ce soit en situation dyadique ou triadique. Par ailleurs, certains chercheurs se sont aussi intéressés à la dynamique de l'interaction elle-même entre l'enfant et le robot, soit en distinguant des interactions isolées vs répétées, ou des interactions libres vs structurées, ou encore des expériences individuelles vs en groupe [7,34]. Plus globalement, si l'on s'intéresse aux questions de recherche motivant ces expériences d'interaction enfant-robot, on retrouve l'idée :

- d'explorer la réponse des enfants autistes aux différents types de robots ;

- d'explorer les contextes dans lesquels un robot peut être utilisé pour stimuler un comportement chez un enfant autiste ;
- de modéliser ou enseigner une tâche spécifique ;
- de proposer un feed-back à l'enfant autiste en situation d'interaction [7,34].

Finalement, si l'on devait répondre à la question « pourquoi un robot ? », certains proposeraient dans une perspective à moyen terme très optimiste que le robot pourrait être un agent diagnostique, un compagnon de jeu, un médiateur social, un actant social, un renforçateur de comportement spécifique, voire un thérapeute personnalisé [7,34].

Pour autant, quand on essaie de regarder dans les études publiées le nombre d'interactions réellement autonomes avec le

robot, on se rend compte que celles-ci sont très limitées. En effet, dans la très grande majorité des études, le comportement du robot est contrôlé par un opérateur. Le robot n'est donc pas en situation d'autonomie interactive réelle [24]. Par ailleurs, la plupart des études comprennent quelques sujets, voire se limitent à des cas uniques et n'autorisent pour l'instant aucune généralisation. Il n'en demeure pas moins que la recherche est très dynamique et nous proposons de détailler dans le paragraphe suivant le projet européen MICHELANGELO qui a été dédié à cette problématique.

3.2. Le projet MICHELANGELO

Le projet MICHELANGELO a été financé par la commission européenne et avait pour objectif de promouvoir des solutions technologiques innovantes dans l'évaluation et la prise en charge des enfants autistes. Le projet européen impliquait près d'une dizaine de partenaires en Angleterre, France, Italie et Malte. Les objectifs étaient extrêmement variés et sont résumés sur la Fig. 4. L'intervention de l'équipe de l'ISIR et de la Salpêtrière est indiquée par les cercles rouges sur la Fig. 4. Nous avons ainsi contribué à la création d'un jeu sérieux *Goliah* et proposé deux expérimentations enfant-robot Nao avec des mesures automatisées issues de caméras 2D/3D Kinect.

Le jeu sérieux *Goliah* est un jeu inspiré par le programme Early Start Denver Model [12]. Le programme de Denver est une intervention thérapeutique précoce de l'autisme basée sur une approche développementale. Il s'agit d'évaluer régulièrement l'enfant via un curriculum extrêmement détaillé et de proposer des tâches qui soient au plus proche des potentialités de l'enfant et tenant compte des progrès développementaux qu'on devrait attendre chez l'enfant ordinaire. Il y a donc une progression extrêmement calibrée de la difficulté. Les comportements cibles qui sont travaillés dans la méthode sont tous des précurseurs de la communication. Les deux plus importants sont l'imitation et l'attention conjointe et ce sont ces deux comportements qui ont été ciblés dans le jeu sérieux *Goliah* [4].

Comme évoqué plus haut, le jeu sérieux *Goliah* a été construit avec un principe de contrainte interactive via deux tablettes fonctionnant en wifi. La première tablette s'adresse à l'enfant et la seconde au parent ou thérapeute. L'enfant pour progresser a besoin d'interagir avec le parent, qui de son côté peut contrôler ce qui est proposé à l'enfant et donc suivre la progression proposée dans la méthode. Pour les tâches d'imitation, nous avons créé six jeux différents, avec des niveaux de sévérité. Ils concernent l'imitation sonore, l'imitation vocale, l'imitation de séquences d'action, l'imitation de construction, l'imitation de phrases ou de séquences

sonores. Pour l'attention conjointe, nous avons créé quatre jeux, là-encore avec des niveaux de sévérité et de conditions différentes et qui concernent l'attention conjointe sur image, l'attention conjointe sur vidéo, l'attention conjointe sur une tâche de dessin, et enfin une tâche d'attention conjointe dans un exercice de recette de cuisine à réaliser à deux [4]. Dans le cadre du programme, nous avons pu mener après la programmation du jeu une étude préliminaire qui a montré que les enfants de cinq à huit ans pouvaient jouer aux jeux de manière relativement intensive, à savoir une demi-heure par jour avec leurs parents ; que les données du jeu pouvaient être envoyées à l'hôpital par Internet pour une supervision par un thérapeute qui lui-même faisait une séance par semaine avec l'enfant à l'hôpital. En règle générale, dans la plupart des tâches, l'enfant progressait en termes de pourcentage de bonnes réponses mais également en termes de vitesse de réponse, mesurée à l'aide des temps de réaction. Néanmoins, dans une autre étude comparant une quinzaine d'enfants suivis avec le jeu en plus de leur traitement habituel et dix enfants contrôles appariés pour l'âge et le sexe, également suivis, nous n'avons pas montré de supériorité dans le groupe traité avec le jeu sur les variables cliniques habituelles, comme l'ADOS ou la Vineland. Néanmoins, dans les deux groupes, les enfants ont progressé significativement après une durée de six mois de traitement [26].

Dans le cadre du projet MICHELANGELO, nous avons aussi conduit deux expériences d'interactions enfants-robots. La première consistait à induire un comportement d'attention conjointe avec le robot Nao, qui pouvait soit regarder passivement une photo d'animal dans la pièce, ou la regarder et pointer du doigt, ou la regarder, pointer du doigt tout en disant à l'enfant de regarder le chat ou le chien. Pendant l'interaction, grâce à des algorithmes spécifiques adaptés pour des caméras 3D Kinect, nous pouvions extraire de manière automatisée les mouvements de l'enfant et en particulier lorsqu'il avait un comportement d'attention conjointe. Les résultats montrent que l'enfant est plus à l'aise en interaction avec un humain pour cette tâche d'attention conjointe qu'avec Nao. Pendant l'interaction, l'enfant autiste par rapport aux enfants typiques montre pas mal de micro-mouvements et une certaine instabilité pendant la tâche en termes de posture [1].

La seconde expérience est une expérience d'imitation motrice, toujours entre des enfants et le robot Nao. Grâce à une architecture informatique dédiée capable d'apprendre par imitation, nous avons proposé des interactions enfant-robot où l'enfant devait imiter des mouvements du robot produits de manière aléatoire, sachant que le robot grâce à cette architecture pouvait se rendre compte qu'il était imité et du coup apprendre l'imitation. Pour vérifier que le robot avait bien appris, il suffisait de renverser les rôles après deux à trois minutes d'interaction : l'enfant faisant alors les mouvements en premier et le robot l'imitant. Lorsque nous avons fait cette expérience et comparé des adultes, des enfants bien portants et des enfants autistes, nous nous sommes rendu compte que, alors que tous étaient capables de faire la tâche, lorsque le robot apprenait à imiter avec des enfants autistes, il avait besoin de beaucoup plus de neurones informatiques pour réaliser cet apprentissage (Fig. 5) [5]. Les résultats de cette expérience nous ont conduits à considérer deux implications :

- il apparaît que le robot est capable de percevoir avec l'enfant autiste une forme de signature sociale, en tout cas dans sa motricité ;
- lorsqu'on regarde dans le détail les résultats même chez les enfants typiques ou les adultes, on se rend compte que si le nombre de neurones informatiques pour apprendre semble suivre une progression linéaire, on note quelques ressauts qui sont associés aux changements de partenaires.



Fig. 4. Les nouvelles technologies dans le projet Michelangelo : aperçu schématique.

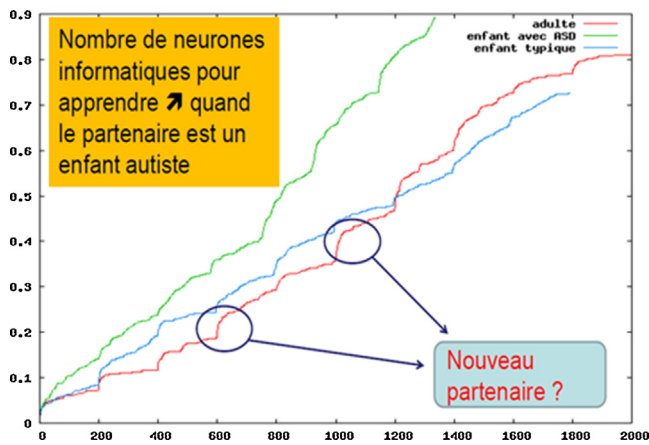


Fig. 5. Nombre de neurones informatiques pour apprendre par imitation en fonction du partenaire.

En d'autres termes, la question nouvelle posée pouvait se résumer à : *outre la signature sociale d'un groupe, le robot est-il capable de retrouver la signature motrice d'un individu donné ?*

4. La robotique développementale : un nouveau paradigme

La robotique développementale propose d'associer la psychologie du développement et la robotique dans des programmes de recherche interdisciplinaires qui intègrent deux directions complémentaires de pensée [10]. D'un côté, la robotique développementale cherche à affiner notre compréhension des fonctions cognitives humaines les plus complexes en utilisant une approche synthétique et intégrée. D'un autre côté, elle cherche à créer des architectures d'apprentissage pour des robots qui soient capables

de reproduire des activités à l'œuvre au cours du développement cognitif de l'enfant. Celles-ci doivent apparaître pendant des interactions entre le robot et un environnement stimulant censé modéliser le développement d'un enfant ou ses apprentissages [10]. C'est dans cette deuxième perspective que nous nous sommes placés pour étudier l'imitation néonatale. Avant même l'apparition du langage, le bébé humain est un fabuleux imitateur. La psychologie du développement inscrit d'ailleurs l'imitation néonatale dans les bases neurales des actions motrices et a souligné l'utilisation de l'imitation par le bébé comme outil précoce de développement en interaction avec l'environnement. Ainsi, dès la naissance, l'enfant imite pour apprendre une nouvelle tâche. Le parent l'imité, parfois inconsciemment, et donne un feedback à l'enfant (*mirroring*). Certains auteurs pensent même que l'imitation constitue les fondements de la cognition sociale et les prémices du développement du moi puisqu'ils impliquent une forme très préliminaire de reconnaissance de l'autre, au sens du « pareil à moi-même », dès le début de la vie [30].

À partir des résultats décrits sur la Fig. 5 et au paragraphe précédent [4], nous avons voulu tester l'hypothèse de Meltzoff dans la même situation, à savoir un apprentissage par imitation de postures motrices. Cette hypothèse propose que l'imitation néonatale serait les prémices de la reconnaissance de l'autre [30]. Pour ce faire, nous avons modifié l'architecture d'apprentissage par imitation en couplant un détecteur de nouveautés dont le réseau de neurones informatiques de sortie était un neurone étiquette pour chacun des partenaires d'interaction. Au total, l'architecture informatique comprenait une combinaison de plusieurs réseaux de neurones artificiels dédiés à l'extraction des indices externes visuels, l'état interne moteur du robot, la reconnaissance de posture et le détecteur de nouveautés. L'apprentissage par imitation restait possible mais une nouvelle propriété est apparue pendant cet apprentissage, à savoir la possibilité pour le robot de reconnaître son partenaire interactif s'il

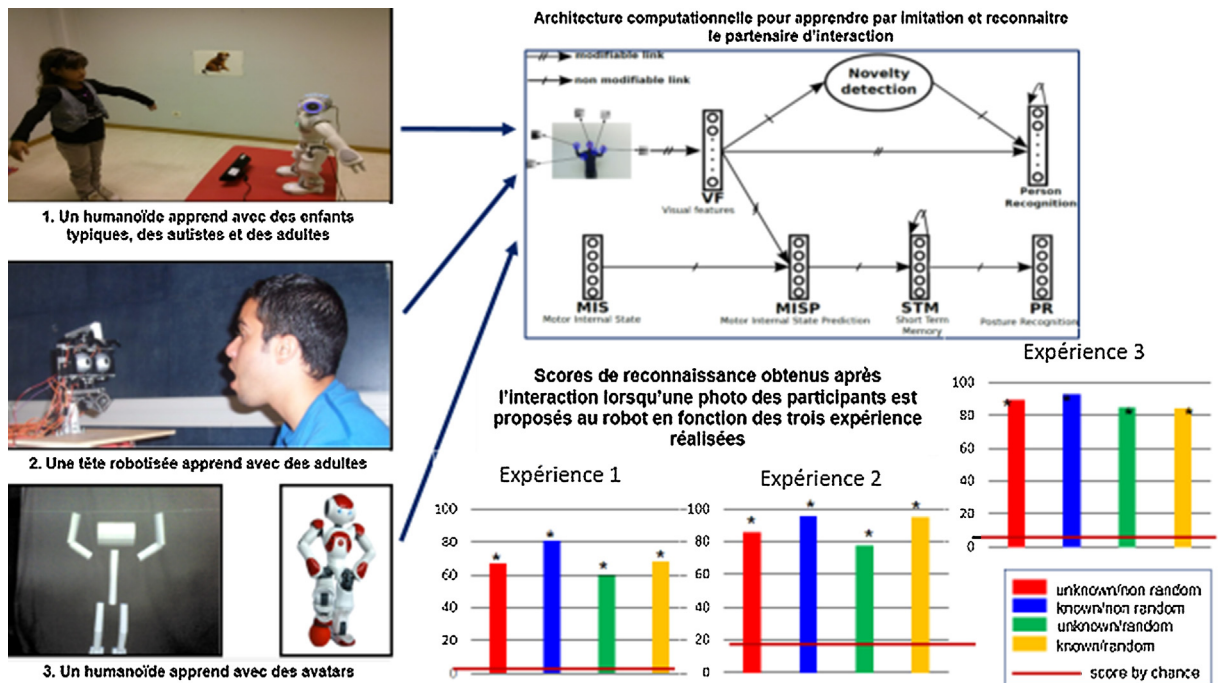


Fig. 6. Aperçu schématique des expériences montrant l'apprentissage par imitation d'un robot et l'acquisition de la reconnaissance de l'autre pendant cet apprentissage. Dans cette figure, nous présentons à gauche les trois expériences d'interaction par imitation réalisées entre deux plateformes robotiques (humanoïde pour les expériences 1 et 3 ; tête robotisée pour l'expérience 2) et des partenaires (enfants typiques et autistes pour l'expérience 1 ; adultes pour les expériences 1 et 2 ; avatars pour l'expérience 3). En haut à droite, l'architecture computationnelle est présentée avec ses différents réseaux de neurone computationnel et leur fonction. En couleur, en bas à droite, nous présentons les scores de reconnaissance obtenus dans chaque expérience dans quatre conditions de tests. Tous les résultats sont très significativement au-dessus du hasard. D'après Boucenna et al., 2016 [6].

se présentait une seconde fois, par exemple sous forme de photo [6]. Afin de généraliser ces résultats à d'autres contextes interactifs ou d'autres typologies de mouvements moteurs appris, nous avons également fait deux autres expériences équivalentes en utilisant, d'une part, une tête robotique et des mouvements faciaux et, d'autre part, la même plateforme robotique humanoïde NAO interagissant avec des avatars sans aucune caractéristique visuelle saillante. Dans tous les cas, la reconnaissance de l'autre est apparue comme une propriété nouvelle du système [6]. Les résultats sont résumés sur la Fig. 6.

Nous pensons que l'utilisation de robots comme outils pour modéliser le développement cognitif humain, basée sur des hypothèses théoriques issues de la psychologie du développement, confirme l'avenir de la robotique développementale. Par ailleurs, ces résultats illustrent comment la reconnaissance de l'autre pourrait émerger de l'expérience imitative précoce, du mapping intercorporel et de l'apprentissage statistique, puisque ces deux autres conditions étaient nécessaires dans l'architecture computationnelle mise en œuvre.

5. Conclusion

Le nombre d'études sur l'utilisation des technologies de l'information, de la communication et de la robotique au service des enfants autistes a progressé rapidement au cours des 15 dernières années. Nous avons essayé de donner un aperçu des deux domaines les plus dynamiques. Concernant les jeux sérieux proposés aux personnes autistes, leur conceptualisation peut parfois être très remarquable et le domaine a bénéficié des avancées réalisées dans le domaine de l'industrie florissante du jeu pour console. Pour autant, la validation clinique reste le plus souvent limitée et l'accessibilité à l'ensemble des personnes autistes l'est tout autant. Le champ de la robotique est quant à lui encore balbutiant, comme il l'est plus généralement dans le champ de la robotique d'accompagnement dans la société civile. Il demeure de nombreux verrous technologiques avant de pouvoir penser une robotique d'accompagnement et d'entraînement permettant de pallier certaines difficultés des enfants autistes. Pour autant, nous sommes convaincus de l'impact potentiel de ces méthodes dans la prise en charge des enfants autistes, même si les limites sont encore importantes et la validité clinique très limitée.

Déclaration de liens d'intérêts

Les auteurs n'ont pas précisé leurs éventuels liens d'intérêts.

Références

- [1] Anzalone SM, Tilmont E, Boucenna S, Xavier J, Maharatna K, Chetouani M, et al. How children with autism spectrum disorder explore the 4-dimension (spatial 3D + time) environment during a joint attention induction task. *Res Autism Spectr Disord* 2014;8:814–26.
- [2] Bernard-Opitz V, Sriram N, Nakhoda-Sapuan S. Enhancing social problem solving in children with autism and normal children through computer-assisted instruction. *J Autism Dev Disord* 2001;31:377–84.
- [3] Billard A, Robins B, Nadel J, Dautenhahn K. Building Robota, a mini-humanoid robot for the rehabilitation of children with autism. *Assist Technol* 2007;19:37–49.
- [4] Bono V, Narzisi A, Jouen AL, Tilmont E, Hommel S, Jamal W, et al. Principles underlying the design of "GOLIAH", a gaming platform for delivering ASD children intensive intervention in nomadic settings. *Front Psychiatry* 2016;7:e70.
- [5] Boucenna S, Anzalone S, Tilmont E, Cohen D, Chetouani M, and the Michelangelo study group. Extraction of social signatures through imitation learning between a robot and a human partner. *IEEE Trans Automon Mental Dev* 2014;99. <http://dx.doi.org/10.1109/TAMD.2014.2319861>.
- [6] Boucenna S, Cohen D, Meltzoff A, Gaussier P, Chetouani M. Cognitive developmental robotics: how robots learn to recognize individuals from imitating children with autism and other agents. *Sci Rep* 2016;6:e19908. <http://dx.doi.org/10.1038/srep19908>.
- [7] Boucenna S, Narzisi A, Tilmont E, Muratori F, Pioggia G, Cohen D, et al. Information communication technology (ICT) and autism: overview and focus on early developmental issues and social robotics. *Cogn Comput* 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/s12559-014-9276-x>.
- [8] Cockburn J, Bartlett M, Tanaka J, Movellan J, Pierce M, Schultz R. Smilemaze: a tutoring system in real-time facial expression perception and production in children with autism spectrum disorder. In: ECAG 2008 workshop facial and bodily expressions for control and adaptation of games. Amsterdam; 2008. p. 3.
- [9] Cohen D, Cassel RS, Saint-Georges C, Mahdhaoui A, Laznik MC, Apicella F, et al. Do motherese prosody and fathers' commitment facilitate social interaction in infants who will later develop autism? *Plos One* 2013;8(5):e61402.
- [10] Cohen D, Viaux S, Saint-Georges C, Leclerc C, Chetouani M, Xavier J. Intérêts de l'étude des interactions précoces mère-bébé par des méthodes automatisées de traitement du signal social : applications à la psychopathologie. *Bull Acad Natl Med* 2016;200(6). Séance du 28 juin.
- [11] Dautenhahn K. Roles and functions of robots in human society: implications for research in autism therapy. *Robotica* 2003;21:443–52.
- [12] Dawson G, Rogers S, Munson J, Smith M, Winter J, Greenberg J, et al. Controlled trial of an intervention for toddlers with autism: the early start denver model. *Pediatrics* 2009;125:17–23.
- [13] Demouy J, Plaza M, Xavier J, Ringeval F, Chetouani M, Périsse D, et al. Differential language markers of pathology in autism, pervasive developmental disorder not otherwise specified and specific language impairment research. *Autism Spectr Disord* 2011;5:1402–12.
- [14] Diehl JJ, Schmitt LM, Villano M, Crowell CR. The clinical use of robots for individuals with autism spectrum disorders: a critical review. *Res Autism Spectr Disord* 2012;6:249–62.
- [15] Durkin K. Videogames and young people with developmental disorders. *Rev Gen Psychol* 2010;14:122–40. <http://dx.doi.org/10.1037/a0019438>.
- [16] Fernandes T, Alves S, Miranda J, Queirós C, Orvalho V. LIFEISGAME: a facial character animation system to help recognize facial expressions. In: Enterprise information systems. Berlin: Springer; 2011. p. 423–32.
- [17] Golan O, Ashwin E, Granader Y, McClintock S, Day K, Leggett V, et al. Enhancing emotion recognition in children with autism spectrum conditions: an intervention using animated vehicles with real emotional faces. *J Autism Dev Disord* 2010;40:269–79.
- [18] Golan O, Baron-Cohen S. Systemizing empathy: teaching adults with Asperger syndrome or high-functioning autism to recognize complex emotions using interactive multimedia. *Dev Psychopathol* 2006;18:591–617.
- [19] Grossard C, Grynspan O. Entraînement des compétences assistées par les technologies numériques dans l'autisme : une revue. *Enfance* 2015;1:67–85.
- [20] Grossard C, Grynspan O, Serret S, Jouen AL, Bailly K, Cohen D. Serious games to teach social interactions and emotions to individuals with autism spectrum disorders (ASD). *Computer and Education (in revision)*.
- [21] Grossard C, Hun S, Serret S, Grynspan O, Foulon P, Dapogny A, et al. Rééducation de l'expression émotionnelle chez l'enfant avec trouble du spectre autistique grâce aux supports numériques : le projet JEMImE. *Neuropsychiatrie de l'enfance et de l'adolescence (in press)*.
- [22] Grynspan O, Martin JC, Nadel N. Exploring the influence of task assignment and output modalities on computerized training for autism. *Interact Stud* 2007;241–66.
- [23] Grynspan O, Weiss PLT, Perez-Diaz F, Gal E. Innovative technology-based interventions for autism spectrum disorders: a meta-analysis. *Autism* 2014;18:346–61.
- [24] Huijnen C, Lexis M, Jansens R, de Witte L. Mapping robots to therapy and educational objectives for children with autism spectrum disorder. *J Autism Dev Disord* 2016;42:1–15.
- [25] Josman N, Ben-Chaim H, Friedrich S, Weiss P. Effectiveness of virtual reality for teaching street-crossing skills to children and adolescents with autism. *Int J Disabil Hum Dev* 2008;7:49–56.
- [26] Jouen AL, Narzisi A, Xavier J, Tilmont E, Bodeau N, Bono V, et al. Gaming open library for intervention in autism at home (GOLIAH): a 6-month single blind matched controlled exploratory study.
- [27] Knight V, McKissick BR, Saunders A. A review of technology-based interventions to teach academic skills to students with autism spectrum disorder. *J Autism Dev Disord* 2013;43:2628–48. <http://dx.doi.org/10.1007/s10803-013-1814-y>.
- [28] Leclerc C, Avril M, Viaux-Savelon S, Bodeau N, Achard C, Missonnier S, et al. Interaction and behaviour imaging: a novel method to measure mother-infant interaction using video 3D reconstruction. *Transl Psychiatry* 2016;6:e816. <http://dx.doi.org/10.1038/tp.2016.82>.
- [29] McIntosh DN, Reichmann-Decker A, Winkelman P, Wilbarger JL. When the social mirror breaks: deficits in automatic, but not voluntary, mimicry of emotional facial expressions in autism. *Dev Sci* 2006;9:295–302.
- [30] Meltzoff AN. "Like me": a foundation for social cognition. *Dev Sci* 2007;10:126–34.
- [31] Mitchell P, Parsons S, Leonard A. Using virtual environments for teaching social understanding to 6 adolescents with autistic spectrum disorders. *J Autism Dev Disord* 2007;37:589–600. <http://dx.doi.org/10.1007/s10803-006-0189-8>.
- [32] Park JH, Abirached B, Zhang Y. A framework for designing assistive technologies for teaching children with ASDs emotions. In: CHI'12 extended abstracts on human factors in computing systems. New York: ACM; 2012. p. 2423–8.
- [33] Saint-Georges C, Mahdhaoui A, Chetouani M, Cassel RS, Laznik MC, Apicella F, et al. Do parents recognize autistic deviant behavior long before diagnosis? Taking into account interaction using computational methods. *Plos One* 2011;6:e22393.

- [34] Scassellati B. How social robots will help us to diagnose, treat, and understand autism. In: *Robotics research*. Springer; 2007. p. 552–63.
- [35] Scassellati B, Admoni H, Mataric MJ. Robots for use in autism research. *Ann Rev Biomed Eng* 2012;14:275–94.
- [36] Serret S, Hun S, Iakimova G, Lozada J, Anastassova M, Santos A, et al. Facing the challenge of teaching emotions to individuals with low-and high-functioning autism using a new serious game: a pilot study. *Mol Autism* 2014;5:1.
- [37] Tan CT, Harrold N, Rosser D. Can you CopyMe?: an expression mimicking serious game. In: *SIGGRAPH Asia 2013 symposium on mobile graphics and interactive applications*. New York: ACM; 2013. p. 73.
- [38] Toth K, Munson J, Meltzoff AN, Dawson G. Early predictors of communication development in young children with autism spectrum disorder: joint attention, imitation, and toy play. *J Autism Dev Disord* 2006;36:993–1005.
- [39] Travers JC, Higgins K, Pierce T, Boone R, Miller S, Tandy R. Emergent literacy skills of preschool students with autism: a comparison of teacher-led and computer-assisted instruction. *Educ Training Autism Dev Disabil* 2011;46:326–38.
- [40] Uljarevic M, Hamilton A. Recognition of emotions in autism: a formal meta-analysis. *J Autism Dev Disord* 2013;43:1517–26.
- [41] Weisman O, Delaherche E, Rondeau M, Chetouani M, Cohen D, Feldman R. Oxytocin shapes parental motion characteristics during parent-infant interaction. *Biol Lett* 2013;9:e20130828.
- [42] Whalen C, Moss D, Ilan AB, Vaupel M, Fielding P, Macdonald K, et al. Efficacy of TeachTown: basics computer-assisted intervention for the intensive comprehensive autism program in Los Angeles unified school district. *Autism* 2010;14:179–97.