

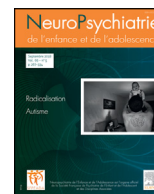


Disponible en ligne sur

ScienceDirect
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France

EM|consulte
www.em-consulte.com



Éditorial/Point de vue

Intelligence artificielle : quelles applications pour la psychopathologie du développement ?



Artificial intelligence: Relevance for developmental psychopathology

INFO ARTICLE

Mots clés :

Intelligence artificielle
Psychopathologie
Développement
Traitement du signal social
Synchronie

Keywords:

Artificial intelligence
Social signal processing
Psychopathology
Development
Affective computing
Synchrony

RÉSUMÉ

Depuis une dizaine d'années, psychiatrie, psychologie, et intelligence artificielle (IA) ont ouvert un dialogue fécond. Dans le domaine des interactions sociales et du traitement des signaux sociaux, de nombreux travaux multidisciplinaires concourent à mieux appréhender la complexité de certains phénomènes psychologiques et à faire progresser les interfaces homme-machine. Ils permettent la prise en compte au plan computationnel de la dimension dyadique, la possibilité de tenir compte de la nature multimodale des échanges et le développement d'outils spécifiques pour extraire de manière précise et automatisée les signaux sociaux des partenaires. Nous proposons ici un bref recensement de nos travaux illustrant l'intérêt d'associer IA et psychopathologie pour explorer certains contextes spécifiques (effet de l'ocytocine, négligence maternelle précoce, robotique développementale) et certaines psychopathologies (autisme, états limites) mais également pour concevoir des applications thérapeutiques comme des jeux sérieux ou des robots compagnons intelligents.

© 2022 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

ABSTRACT

Over the past 10 years, psychiatry, psychology and artificial intelligence (AI) have opened a fruitful dialogue. In the field of social interactions and social signal processing, many multidisciplinary works have contributed to a better understanding of the complexity of certain psychological phenomena and to the progress of human-machine interfaces. They allow the computational consideration of the dyadic dimension, the possibility to take into account the multimodal nature of turn taking and the development of specific tools to accurately and automatically extract the social signals of partners. We propose here a brief survey of our work illustrating the interest of not only associating AI and psychopathology to explore certain specific contexts (effect of oxytocin, early maternal neglect, developmental robotics) and certain psychopathologies (autism, borderline states) but also to design therapeutic applications such as serious games or intelligent companion robots.

© 2022 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

1. Introduction

Depuis une dizaine d'années, psychiatrie, psychologie, et intelligence artificielle (IA) ont ouvert un dialogue fécond. L'expression psychiatrie computationnelle rend compte de ce nouveau domaine [1]. Elle comprend la psychiatrie qui utilise des outils connectés et leurs données numériques « digital psychiatry », la psychiatrie fondée sur les grandes bases de données et leur analyse par apprentissage machine « big psychiatry » et enfin la modélisation en psychiatrie basée sur les neurosciences computationnelles « psychiatry modelling » [2]. Si des applications identiques existent dans le champ de la psychiatrie du développement, l'apport de l'IA à la psychopathologie soulève aussi de nouveaux paradigmes hors

des domaines d'application maintenant classique de la psychiatrie computationnelle.

En particulier, dans le domaine des interactions sociales et du traitement des signaux sociaux, de nombreux travaux multidisciplinaires associant « psy » et « ingé » concourent à mieux appréhender la complexité de certains phénomènes psychologiques et à faire progresser les interfaces homme-machine. Le champ du traitement des signaux sociaux comprend la reconnaissance et la production d'émotions ou expressions faciales [3], les signaux communicationnels verbaux et non-verbaux. Il comprend aussi les phénomènes de synchronie que l'on peut définir comme l'adaptation dynamique et réciproque des comportements et états émotionnels des partenaires interactifs, d'un point de vue

temporel et dyadique [4]. Ces nouvelles méthodes conduisent déjà à quelques applications comme la mesure automatisée du mouvement de tête pendant des interactions avec des enfants autistes [5] ou la proposition d'entretiens psychologiques avec un avatar [6].

Les enjeux pour l'application de méthodes d'ingénierie dans le champ de la psychopathologie du développement sont :

- La prise en compte au plan computationnel de la dimension dyadique ;
- la possibilité de tenir compte de la nature multimodale des échanges ;
- le développement d'outils spécifiques pour extraire de manière précise et automatisée les signaux sociaux des partenaires ;
- des enjeux éthiques spécifiques à l'utilisation de machine d'une part, et de données informatiques personnelles, d'autre part.

En psychologie expérimentale ou du développement tout comme en robotique, on voit depuis un moment des études portant sur l'imitation, l'attention conjointe, les tours de parole, les interactions sociales avec ou sans rupture comme dans le protocole dit du visage impassible « still face » [7]. On considère la dimension dyadique de l'interaction comme un signal social en soit avec des corrélats anatomo-fonctionnels [8] et/ou hormonaux [9].

Dans cet article, nous proposons de reprendre quelques travaux que nous avons menés conjointement illustrant l'intérêt d'associer technologies de l'information et de la communication (TIC), intelligence artificielle (IA) et psychopathologie. Dans une première partie, nous essaierons de rapporter notre démarche interdisciplinaire dans l'exploration de questions psychopathologiques. Dans une seconde partie, nous détaillerons des applications concrètes thérapeutiques sur lesquelles nous travaillons. Enfin, nous survolerons dans une dernière partie, les principaux enjeux éthiques qui ne constituent pas le cœur de ce travail mais qui ont été abordés par d'autres [10].

2. TIC et IA pour explorer la psychopathologie

2.1. Trouble du neuro-développement (TDN) et films familiaux

Depuis l'étude princeps de Massie et les travaux pionniers de l'équipe de Tours [11], plusieurs groupes se sont intéressés à l'étude des signes précoces d'autisme à partir du recueil des films familiaux. Bien que rétrospectives, ces études ont l'avantage de montrer le bébé dans son milieu naturel et en condition de vie ordinaire (bain, anniversaire, tétée, jeux et parc d'activité, Noël...). Au total, on constate très peu de signes avant l'âge d'un an. De plus, ils sont souvent non spécifiques et ne permettent pas de distinguer parmi les TND, autisme et déficience intellectuelle [12]. En collaborant avec l'équipe de Pise, nous avons extrait l'ensemble des comportements des bébés mais aussi des parents en tenant compte des interactions réussies ou synchrones dans les films familiaux d'enfants autistes. Nous les avons comparés à des enfants typiques et des enfants présentant une déficience intellectuelle sans signes autistiques lorsque le diagnostic a été posé c'est-à-dire à l'âge de 3 à 5 ans [13]. Pour ce faire, nous avons considéré la dynamique interactive en extrayant dans la base tout comportement du parent couplé à un comportement synchrone du bébé dans une fenêtre de 3 secondes. À travers la chronologie des comportements dans cette fenêtre temporelle brève, nous avons déterminé le sens de l'interaction (du parent vers le bébé) mais aussi (du bébé vers le parent). De ces études, on peut retenir qu'au premier semestre, les stimulations des parents sont essentiellement des vocalisations, mais aussi du toucher, et les réponses du bébé des vocalisations, des regards et des sourires. Les choses changent au deuxième et au troisième semestre, puisque les vocalisations des parents sont encore très majoritaires,

mais le toucher est bien moins utilisé ; chez le bébé normal apparaissent beaucoup plus des comportements vers des objets et des comportements intersubjectifs vers des personnes.

Lorsque les parents de bébé à devenir autistique répondent au bébé, on constate qu'ils ne diffèrent aucunement des parents d'enfants normaux, ce qui veut dire que leur parentalité est strictement normale. Par contre, lorsque le parent débute l'interaction avec son bébé à devenir autistique, on voit qu'il continue à utiliser le toucher jusqu'au troisième semestre, qu'il cherche à hyperstimuler son enfant avec des vocalisations riches en prosodie émotionnelle (ou mamananais) et enfin que les pères sont significativement plus présents dans les interactions au 3^e semestre comparés aux pères d'enfants normaux [14]. En d'autres termes, ils sentent que leur bébé n'est pas tout à fait comme les autres. Du côté du bébé à devenir autistique, on voit très nettement l'absence d'explosion des comportements intersubjectifs, même s'ils progressent d'un semestre à l'autre. Les principaux résultats sont résumés dans la Fig. 1.

Enfin, lorsqu'on explore la dynamique des comportements interactifs des 2 partenaires (le bébé et le parents) en utilisant des méthodes de factorisation en matrices non négatives et que l'on compare ces matrices via le calcul de l'information mutuelle normalisée (que l'on peut assimiler à un score de ressemblance), on voit que plus le semestre avance, plus les autistes perdent en ressemblance avec les typiques (au contraire des déficients intellectuels dont l'information mutuelle normalisée reste stable dans le temps vis-à-vis des typiques), montrant par là un développement déviant qui va en s'accroissant au fil des 3 premiers semestres de la vie [13].

2.2. Dynamique motrice et ocytocine

L'équipe de Ruth Feldman a été l'une des premières à montrer de manière formelle chez l'humain le rôle de l'ocytocine dans les interactions précoces mère-bébé avec des phénomènes de mimétisme biologique liés à des modifications de la qualité des interactions. Dans un essai en cross-over où des pères après avoir reçu en inhalation de l'ocytocine ou du placebo venaient participer à une interaction libre avec leurs bébés âgés de 6 mois, elle a montré que :

- Lorsque les pères recevaient en inhalation de l'ocytocine, il y avait bien un pic d'ocytocine salivaire mesurable ;
- pendant l'interaction libre avec leur bébé, celle-ci s'avérait de meilleure qualité avec plus de toucher, de réciprocité sociale, de regards sociaux et de manipulations d'objets lorsque le papa recevait de l'ocytocine ;
- par ailleurs, alors que le bébé ne recevait aucune molécule, il produisait un pic d'ocytocine salivaire lorsque le père avait reçu de l'ocytocine [9].

Pour explorer par quels mécanismes comportementaux et interactifs était médiée cette augmentation d'ocytocine chez le bébé, nous avons extrait deux types de signaux sociaux lors des interactions filmées :

- Les vocalisations et tours de parole des deux partenaires, autrement dit du père et du bébé ;
- la distance relative entre le père et le bébé (ou proxémie) et ses dérivés mathématiques, à savoir la vitesse et l'accélération.

Les vocalisations et les tours de parole n'étaient pas modulés par l'inhalation d'ocytocine chez le père [15]. Par contre les paramètres de proxémie, et en particulier l'accélération relative qui dans cette expérience peut être estimée comme la vitesse de déplacement de la tête du père (puisque le bébé assis dans un transat bouge très peu d'avant en arrière), sont tout à fait modulées par l'ocytocine. En outre, l'amplitude de cette vitesse pendant l'interaction est

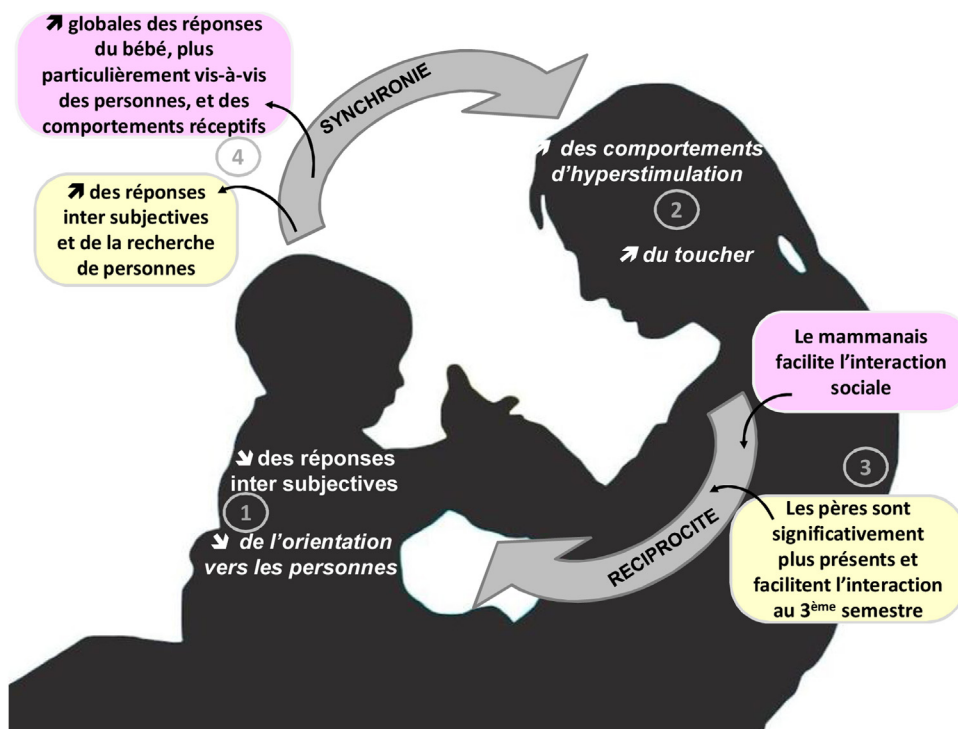


Fig. 1. Bébés développant un tableau autistique à partir de l'étude des films familiaux: trajectoires pathologiques des comportements du bébé et changements dans les stimulations des parents pour s'adapter à leur enfant. Dans cette figure, nous résumons les interactions précoces entre parents et bébés développant un tableau autistique à partir de l'étude des films familiaux. Les bébés montrent moins de comportements intersubjectifs et d'orientation vers les personnes. Les parents s'adaptent en utilisant plus de comportements d'hyperstimulation et de toucher [13]. Les comportements d'hyperstimulation et les comportements calmants sont définis à partir de vocalisations parentales qui cherchent à moduler et réguler le niveau d'engagement et l'humeur du bébé en cherchant à l'exciter ou au contraire le calmer. Les comportements d'hyperstimulation sont plein de prosodie émotionnelle (ou mammans), et cette prosodie est significativement associée à plus de réponses côté du bébé après une vocalisation parentale, plus particulièrement vis-à-vis des personnes, et plus de comportements réceptifs. Au troisième semestre, comparés aux pères de bébés connaissant un développement normal, les pères d'enfant développant plus tard un autisme vont être significativement plus présents dans les interactions. Les vocalisations paternelles vont être associées à plus de réponses intersubjectives et plus de recherche de personne chez les bébés à devenir autistique [14].

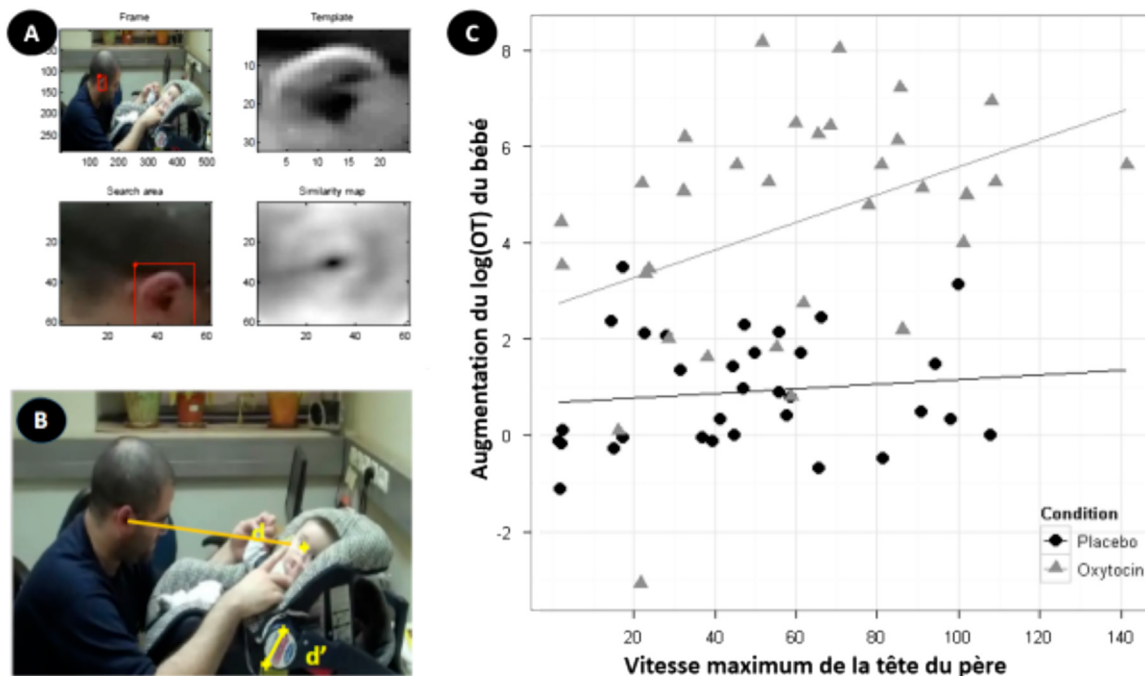


Fig. 2. Effet d'une inhalation paternelle d'ocytocine (OT) sur les interactions pères-bébés et rôle de la vitesse de déplacement de la tête du père sur l'augmentation d'ocytocine chez le bébé. Dans cette figure, nous expliquons en A comment nous avons suivis le déplacement de la tête du père en réalisant un suivi automatisé de l'oreille. B. la distance d entre le père et le bébé pendant l'interaction a été estimée en mesurant la distance entre l'oreille du père et l'entre 2 yeux du bébé, normalisé sur la distance d' de la vis pour stabiliser le transat (la normalisation permet de tenir compte des biais de zoom et d'angle entre les différentes sessions filmées). C. l'augmentation du log (ocytocine salivaire) du bébé est corrélée au maximum d'accélération de d qui équivaut à la vitesse de déplacement de la tête du père car à 6 mois le bébé se déplace très peu d'avant en arrière [16].

extrêmement corrélée à l'augmentation d'ocytocine chez le bébé (Fig. 2) [16]. Outre le fait que nous savions que les paramètres de proximité pouvaient être modulés par l'ocytocine, en particulier chez les couples adultes amoureux [17], ces résultats nous ont également permis de faire un lien avec les travaux sur le phénomène d'empreinte chez l'oiseau et nous avons émis l'hypothèse que l'humain gardait trace au plan phylogénétique de cette sensibilité au mouvement (ou motionese) qui pouvait être régulée par les variations d'ocytocine [16].

2.3. Stress ressenti vs. stress hétéro-perçu

L'expérience suivante est basée sur l'idée que (1) la réponse au stress a une expression multimodale, et (2) la perspective évolutive confère à cette réponse à la fois un enjeu de survie individuelle et une fonction de communication. Par ailleurs, l'une des difficultés princeps en psychopathologie réside dans le défi pour le clinicien de se fier au discours et ressenti transmis par le patient quand celui-ci manque d'insight ou de recul sur lui-même. Pour investiguer cette question chez des patients ayant peu d'insight comme les adolescents dits borderline qui sont aussi très sensibles au stress, nous avons mis au point un protocole d'étude original d'analyse de la réponse multimodale à un stress aigu en l'occurrence un test de calcul mental avec retours sociaux [18]. L'idée générale organisant le dispositif découle du double constat suivant :

- Au moment où l'on vit le stress, il existe des signes extérieurs, propres à chaque espèce, et parfois propres à un individu, qui peuvent révéler—ou trahir—l'état de stress, et qui sont identifiables par les autres membres de l'espèce ;
- dans l'espèce humaine, douée de conscience réflexive et de langage, il est possible de partager avec autrui sa propre expérience de stress, d'en dire quelque chose, au décours de l'expérience elle-même.

À partir de cette distinction, nous avons défini le stress hétéro-perçu (c'est-à-dire évalué par un observateur extérieur qui observe le sujet en train de vivre l'expérience) ; et le stress auto-perçu ou ressenti (c'est-à-dire évalué par le sujet lui-même, au décours immédiat de l'expérience stressante).

En parallèles de ces valeurs attribuées au stress, des paramètres physiologiques (fréquence cardiaque, la pression artérielle, la fréquence respiratoire, la conductance cutanée, la température) et comportementaux (point d'intérêt du visage, quantité de mouvement du corps et des certaines parties du corps, changement de posture) étaient également mesurés pendant la passation du test. Une méthodologie nouvelle pour l'évaluation multimodale du stress social a ainsi été développée [19]. Nos résultats ont montré que le stress auto-perçu et le stress hétéro-perçu sont des phénomènes à la fois proches et distincts. Par ailleurs, l'évaluation du stress avec des méthodes d'apprentissage automatique grâce à la multimodalité donne d'excellents résultats de classification pour le stress auto-perçu et le stress hétéro-perçu. Dans les meilleurs sous-ensembles de variables sélectionnées, nous avons trouvé des variables communes, à la fois comportementales et physiologiques, participant à la classification des deux perceptions. Nous avons également trouvé des variables spécifiques avec une distribution opposée entre variables comportementales et variables physiologiques entre le stress auto-perçu ou ressenti (plus de caractéristiques physiologiques) et le stress hétéro-perçu (plus de caractéristiques comportementales) [18]. Dans une autre série d'expériences comparant des adolescents bien portant et des adolescents borderline, nous avons montré que les adolescents borderline étaient beaucoup plus stressés pendant l'expérience de calcul mental que les adolescents bien portant mais qu'il avait un déficit pour percevoir leur stress alors mieux perçu par un

observateur ou par la classification automatique [20]. À notre connaissance, il s'agit de la première fois qu'un déficit d'insight est expérimentalement retrouvé chez ces adolescents.

2.4. Cas de la négligence maternelle précoce

La négligence maternelle précoce est une des situations de maltraitance les plus complexe à aborder au plan clinique car les intervenants oscillent entre deux positions potentiellement contradictoires : d'une part soutenir la maman pour l'aider à ne plus négliger son enfant et répondre à ses besoins physiques et affectifs ; d'autre part, protéger l'enfant, répondre aux services sociaux et juridiques de protection de l'enfance et anticiper les séquelles sur le développement de l'enfant en recommandant un placement [21]. En parallèle d'une étude clinique longitudinale centrée sur cette problématique de négligence, nous avons tenté d'encore plus complexifier notre niveau d'analyse automatisée des interactions précoces en proposant une capture d'information en 2D et 3D. En effet, les méthodes computationnelles offrent en théorie la possibilité d'étudier des signaux sociaux et comportementaux entre plusieurs partenaires de manière simultanée et dynamique ou continue. Nous avons d'abord créé un dispositif couplant dans le temps et dans l'espace des caméras 2D et 3D pour permettre la reconstruction en 3D des interactions mères bébés [22]. Grâce à ce dispositif original, nous avons enregistré 20 dyades mère-bébé (âgés de 13 à 36 mois) pendant 4 minutes d'interaction libre avec la consigne pour les mamans de jouer à la dinette avec leur nourrisson tous âgés de plus d'un an. Dix dyades étaient considérées à très haut risque psychosocial du fait d'une négligence maternelle importante alors que les 10 autres n'avaient pas de risque spécifique (contrôles). À partir des données d'image 2D et 3D et de la reconstruction 3D de l'espace d'interaction, nous avons extrait des paramètres individuels (quantité de mouvement et ratio d'activité motrice pour chaque partenaire) et des paramètres dyadiques liés à la dynamique motrice (distance entre les têtes, qui contribue à modifier la distance des têtes, % de temps passés en face à face ou orienté vers la table de la dinette, tours de paroles motrices (Ratio de synchronie motrice, Ratio de recouvrement moteur, et Ratio de pauses motrices). Ces paramètres extraits automatiquement ont été comparés à une cotation experte de l'interaction à l'aide du CIB (Coding Interactive Behavior) instrument développé par Ruth Feldman. Les résultats montrent que les paramètres individuels et dyadiques extraits corrélaient parfaitement aux scores du CIB. D'autre part, une classification par apprentissage statistique (Support Vector Machine) n'utilisant que les paramètres moteurs extraits à partir des enregistrements vidéo 2D et 3D permet de classer correctement 100 % des dyades en deux groupes distincts : dyades négligentes et dyades contrôles. Ces données motrices de bas niveaux sont donc suffisantes pour distinguer dyades pathologiques des dyades contrôles [22].

Cette méthode originale semble donc très prometteuse. Elle pourrait permettre, à bas coût, en utilisant des techniques computationnelles et des nouvelles technologies, d'étudier des interactions dans des contextes de psychopathologie même si la définition de paramètres d'interaction pertinents est un préalable. D'autre part, le couplage de méthode automatisée et de méthode par cotation externe experte autoriserait deux niveaux d'analyse temporelle distincts : dynamique pour la première et intégrative pour la seconde qui pourrait permettre d'étudier des corrélats physiologiques contemporains aux interactions [23].

2.5. Robotique développementale

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. 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 basée sur de l'apprentissage machine. Le but est de reproduire des capacités humaines, cognitives ou sociales, sans s'imposer un quelconque agenda développemental. D'un autre côté, elle peut aussi 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 sensé modéliser le développement d'un enfant ou ses apprentissages [24,25]. 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 [26]. Certains auteurs pensent même que l'imitation constitue l'un des fondements de la cognition sociale et les prémices du développement du moi puisque la faculté d'imiter implique une forme très préliminaire de reconnaissance de l'autre au sens du « pareil à moi-même » dès le début de la vie [27].

À partir d'une architecture informatique permettant à des robots en interaction avec un partenaire d'apprendre par imitation, nous avons implémenté une plateforme robotique humanoïde pour interagir au plan moteur avec des partenaires. Le cœur de l'architecture pour apprendre par imitation comprend un réseau de neurones artificiels pour extraire les stimuli visuel (VF = Visual Features sur la Fig. 3), un réseau de neurones artificiels correspondant à la position des membres du robot autrement dit sa proprioception (MIS = Motor Internal State sur la Fig. 3), un réseau de neurones artificiels couplant les deux réseaux précédents (MISP = Motor Internal State Prediction sur la Fig. 3), et un réseau de neurones artificiels de mémoire de travail (STM = Short Term Memory sur la Fig. 3). Le dispositif robotique a été programmé pour produire aléatoirement des mouvements qui devaient être imités par un partenaire. Après quelques minutes d'interaction, le robot comprend qu'il était imité, a appris la correspondance entre ce qu'il fait et ce qu'il voit (ou « mapping intercorporel ») et les rôles peuvent être inversés, ce qui nous garantissait le fait que le système avait appris par imitation. Dans une première expérience, nous avons utilisé trois groupes de partenaires et étudié comment le système apprenait par imitation avec chacun. Nous avons montré que le robot était capable de détecter la signature sociale de son partenaire puisque certains paramètres d'apprentissage permettaient de distinguer les enfants typiques, les adultes, mais également les enfants autistes [28]. Dans une seconde expérience, nous avons voulu tester l'hypothèse de Meltzoff qui propose que l'imitation néonatale serait les prémices de la reconnaissance de l'autre [27]. Pour ce faire nous avons modifié l'architecture d'apprentissage par imitation en couplant un détecteur de nouveauté (Novelty detection sur la Fig. 3) dont le réseau de neurones informatiques de sortie était un neurone étiquette pour chacun des partenaires. 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 ou proprioception, la mémoire de travail, 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 se présentait une seconde fois, par exemple sous forme d'image [29]. Afin de généraliser notre expérience qui avait utilisé la même procédure qu'en [28] nous avons également fait une expérience équivalente en utilisant une tête

robotique et des mouvements faciaux, et également la même plateforme robotique humanoïde 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 [29]. Suite à cette série d'expériences qui nous a mis sur la voie d'une signature motrice de l'autisme, nous explorons actuellement la possibilité que cette psychopathologie précoce implique un développement déviant des aptitudes motrices comprenant en outre le maintien de micromouvements au cours du développement moteur [30,31].

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.

3. Applications thérapeutiques

3.1. Les jeux sérieux

Les jeux sérieux sont les principales applications des TIC dans le champ de la psychopathologie. Ce sont des jeux vidéo qui intègrent un agenda éducatif dans leur construction que le joueur ne perçoit pas. Lorsque ces jeux sont capables de s'adapter automatiquement à l'utilisateur ou à certaines caractéristiques, ils intègrent souvent une composante d'IA. En fonction des cibles travaillées dans les jeux ils peuvent être dans le champ de la santé (ex : contrôle de l'impulsivité dans le trouble de l'attention avec hyperactivité) ou des sciences de l'éducation (ex : améliorer l'apprentissage de la lecture).

L'utilisation de jeux sérieux pour favoriser l'émergence de capacités d'interactions sociales plus abouties chez les personnes avec autisme est de plus en plus explorée. Pour les enfants autistes, plusieurs jeux ont été développés. Leurs objectifs se divisent en deux groupes [32]. Les premiers cherchent à améliorer les habiletés sociales ; les seconds certaines aptitudes cognitives (par exemple l'attention). Dans l'ensemble on constate pas mal de limitations concernant les recherches menées dans ce domaine (habiletés cognitives travaillées par secteur, plus entraînées qu'apprises, absence de généralisation à la vie réelle, faible attractivité des jeux limitant leur impact motivationnel, jeux ne s'adressant qu'aux personnes de bon niveau, étude clinique souvent absente ou avec de petits groupes). Malgré ces limites, l'utilisation des jeux sérieux semble pouvoir offrir de réelles opportunités pour travailler auprès des patients avec autisme [33].

GOLIAH est une plateforme de jeux numériques inspirés par les principes de l'Early Start Denver Model permettant un entraînement intensif de l'attention conjointe (AJ) et de l'imitation, deux habiletés clés pour les premières interactions sociales et la communication. Le jeu contraint l'enfant pour pouvoir jouer à interagir avec ses parents et a été pensé pour un déploiement à domicile pour prolonger les soins de manière ludique. Une première version a été évaluée dans une étude pilote montrant la faisabilité de l'entraînement à domicile, avec l'aide des parents, en complément des soins proposés [34]. Par ailleurs, une corrélation entre l'amélioration à réaliser des tâches d'AJ après entraînement avec GOLIAH et une « normalisation » des profils d'activités cérébrales et de connectivité enregistrés en EEG quantifié a été retrouvée [35]. Nous avons finalisé une version au design renouvelé accessible en ligne e-GOLIAH pour déploiement à grande échelle sur une

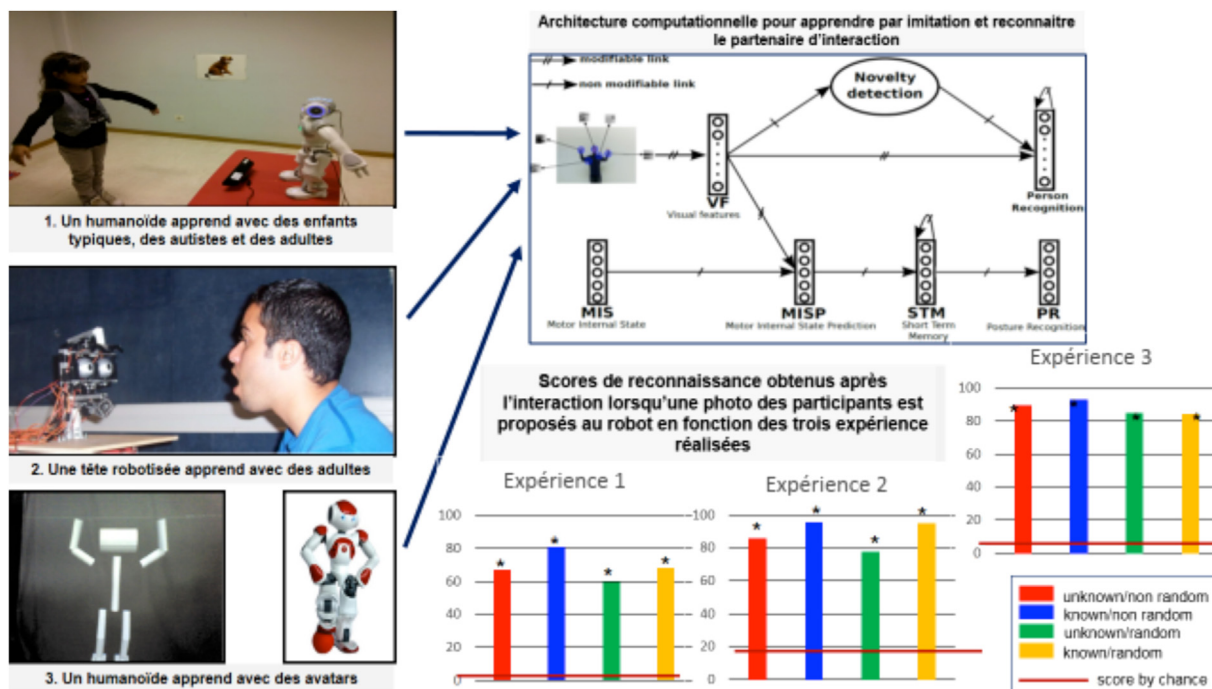


Fig. 3. Aperçu schématique des expériences montrant l'apprentissage par imitation d'un robot et l'acquisition de la reconnaissance de l'autre pendant cet apprentissage. Dans cette figure, nous présentons à gauche les 3 expériences d'interaction par imitation réalisées entre 2 plateformes robotiques (humanoïde pour les expériences 1 et 3 ; tête robotique 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 4 conditions de tests. Tous les résultats sont très significativement au-dessus du hasard [29].

plateforme thérapeutique Curapy.com qui doit nous permettre de mener une étude médico-économique de grande ampleur.

JeStiMulE est un jeu sérieux développé par l'équipe de pédopsychiatrie du CHU de Nice et le laboratoire CoBTek. Il a obtenu une bonne validation clinique. Il vise à travailler la reconnaissance des émotions et de la douleur grâce aux expressions faciales mais également grâce aux gestes. Ce jeu s'adresse à des enfants et adolescents avec autisme, quels que soient leur niveau de fonctionnement, leurs compétences intellectuelles et langagières. Il permet d'améliorer la reconnaissance des expressions faciales [36]. Mais pour que le joueur puisse avoir un feedback sur ce qu'il fait, il doit être aidé par un clinicien qui l'accompagne dans cet entraînement. L'avenir consiste à imaginer des jeux sérieux intégrant des capacités d'adaptation et feedbacks performants issues de l'IA. Actuellement, nous travaillons sur une nouvelle version intégrant un feedback au joueur sur sa production émotionnelle utilisant un algorithme par apprentissage profond. Avec JEMImE, il s'agit de travailler la production émotionnelle uni- et bi-modale en contexte social et pas seulement la reconnaissance émotionnelle. Le principal verrou technologique est la programmation d'un algorithme de reconnaissance émotionnelle capable de donner en temps réel ce feedback au joueur [37].

3.2. Le robot compagnon intelligent

Trois questions principales se posent quand on aborde la robotique sociale médicale :

- Est-ce le dispositif est utile et pourquoi le propose-t-on au-delà de l'aspect gadget (question du côté du clinicien) ;
- quels sont verrous technologiques que cela pose (question du côté de l'ingénieur) ;
- éventuellement comment ça marche au plan affectif et cognitif (question partagée).

Si dans le paragraphe précédent on a présenté des jeux sérieux qui peuvent incorporer des personnages sous forme d'avatars, une question préalable se pose aussi : l'utilisation d'un robot change-t-elle la donne sur le plan de l'interaction avec l'enfant. Clairement, le fait d'avoir une présence incarnée dans le mode physique au cours de l'interaction change le ressenti de l'enfant et l'investissement de la relation et sa dynamique. Cet effet a été retrouvé dans plusieurs expériences [38].

L'utilisation des robots auprès de personnes avec autisme se développe particulièrement depuis ces 10 dernières années. Actuellement, de plus en plus de chercheurs s'appuient sur ces supports pour tenter de soutenir les interactions avec les personnes avec autisme. Certains cliniciens utilisent déjà des robots lors d'activités thérapeutiques avec l'enfant indépendamment de toute IA dans des contextes où le robot est télé-opéré c'est-à-dire contrôlés par un opérateur [39]. De très nombreux types de robots ont été utilisés, certains humanoïdes, d'autres plutôt ludiques, petits, grands, avec des propriétés variées. Néanmoins, quelles que soient les vidéos qu'on peut trouver sur internet parfois tout à fait fascinantes, il est important de noter que la plupart des protocoles présentent des robots télé-opérés et rarement des interactions enfant-robot spontanées et avec des robots capables de s'adapter à l'enfant. Par ailleurs aujourd'hui très peu d'études cliniques sont disponibles, et de ce point de vue la recherche dans le champ de la robotique n'a finalement pas encore rejoint celle des jeux sérieux [40,41]. L'étude la plus remarquable a collecté 127 heures d'interaction pour 12 enfants avec autisme pendant 30 jours. Même si les enfants ont fait des progrès, cette exposition est trop courte pour conclure et encore moins comprendre l'impact que des robots pourraient avoir chez l'enfant autiste [42].

Pour rester sur des propositions réalistes sur lesquelles nous travaillons, intégrant dans les interactions enfant-robot des systèmes d'IA, nous résumons succinctement deux protocoles de robots d'accompagnement pour enfants en difficultés d'apprentissages.

Tableau 1

IA et psychopathologie du développement : exemples de paramètres à prendre en compte lors d'un travail interdisciplinaire.

Exemples	Contexte et capture d'information	Patient	Traitement automatique des données	Dimension dyadique	Intérêt
Films familiaux et TND	Contexte naturel, outils banalisés	TND	Markov, SVM	Oui	Mesurer le mamans Tenir compte du sens de l'interaction
Motricité et ocytocine	Contexte expérimental, outils banalisés	Non	SVM	Oui	Mesurer la dynamique motrice de l'interaction
Stress ressenti et hétéro-perçu	Contexte expérimental, Captures avec outils spécifiques	Adolescent borderline	Adaboost	Non	Mesurer les tours de parole Aborder la problématique par sa multimodalité Distinguer stress ressenti et stress hétéro-perçu
Négligence maternelle	Contexte expérimental, Captures avec outils spécifiques	Bébé à risque	SVM	Oui	Mesurer la dynamique motrice de l'interaction
Robotique développementale	Contexte expérimental, Captures avec outils spécifiques	TND	Réseau de neurones	Oui	Modéliser le développement d'un robot comme le développement d'un enfant

TND : trouble du neurodéveloppement ; SVM : support vector machine.

Le premier que nous avons appelé robot AVS (pour Aide de Vie Scolaire) consiste à imaginer un scénario où les enfants en difficulté attentionnelle, porteraient un petit bonnet EEG Wifi qui permettrait l'enregistrement online de leur engagement attentionnel grâce à une métrique EEG bien établie. Cette information, difficilement exploitable telle que, serait envoyée au robot qui aurait également de l'information venant de caméras qui permettraient de mesurer les mouvements et micromouvements de l'enfant. Ces informations EEG et de mouvement entraineraient de la part du robot plusieurs types de réponses, certaines pour féliciter l'enfant, d'autres pour le relancer, ou encore d'autres pour discuter d'une pause avec la maîtresse. Des algorithmes adaptatifs pour définir les seuils les plus pertinents pour que les interventions du robot soient efficaces et non pas dérangeantes vis-à-vis de l'enfant, seront intégrés et permettront une individualisation de la réponse du robot à chaque style d'enfant et surtout après avoir pris connaissance des caractéristiques de l'enfant au cours des interactions précédentes. Actuellement, nous avons bien contrôlé les aspects EEG, les artefacts moteurs pour lesquels nous avons développé des algorithmes pour nettoyer le bruit du message EEG envoyé au robot et nous réalisons la partie relance du scénario [43]. Au plan cognitif et psychoaffectif, l'idée est de stimuler l'attention d'une part, mais également de jouer sur des aspects motivationnels liés à l'utilisation du robot.

Le second projet porte sur la dysgraphie et implique également l'école Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Du point de vue des interactions enfant-robot, le système qu'on appelle Co-Writer tire bénéfice de l'effet protégé. L'enfant reçoit pour consigne d'apprendre à écrire au robot. De ce fait il est profondément valorisé, alors que d'habitude quand il écrit, on a plutôt tendance à lui dire qu'il n'écrit pas bien. Ce que l'enfant ne sait pas, c'est que le robot sait déjà écrire, et qu'il adaptera son écriture en fonction des difficultés de l'enfant, grâce à un système d'IA intégré sur un système d'écriture sur tablette. Par ailleurs, nous développons également un jeu sérieux sur tablette DYNAMICO permettant de travailler un certain nombre de paramètres très importants pour l'écriture que sont la pression, le rythme et la maîtrise de l'angle d'attaque du stylo [44]. L'utilisation avec un enfant très dysgraphique d'un prototype associant le système Co-Writer et DYNAMICO pendant 6 mois nous a montré le potentiel de cette proposition de remédiation [45]. Une vidéo illustrant la prise en charge est disponible en ligne <https://youtu.be/0iLScP0PjzU>.

4. Questions éthiques

Nous sommes conscients que ce type de recherches apportent son lot de questions voir de défis éthiques. Même si nous n'avons pas pour ambition de les parcourir dans le détail dans ce travail présentant nos recherches récentes et le contexte international dans lequel elles s'inscrivent, il est difficile de s'exonérer de considérations éthiques. Nous voudrions brièvement lister les principales questions. Les premières sont partagées avec l'ensemble des recherches impliquant des personnes vulnérables. Il s'agit :

- du respect de l'autonomie de la personne ce qui implique pour les personnes vulnérables comme les enfants et les personnes avec autisme, encore plus de prudence et d'attention ;
- du respect d'un ratio le meilleur possible entre les bénéfices attendus et les risques pris sachant qu'aucune recherche dans le domaine des TIC ne doit être dangereuses pour l'enfant ou ses proches ;
- du respect du principe de justice ou d'égalité qui dans ce type de recherche peut être un défi vu l'inégalité à l'accès aux TIC [46].

D'autres questions sont plus spécifiques. D'une part, pour un même objet de recherche, les objectifs peuvent être positionnés différemment et relevés du marché « libres » du divertissement, des sciences de l'éducation, ou de la recherche médicale quand il s'agit de diagnostic ou de rééducation. Ainsi, pour prendre 2 exemples cités plus haut, le jeu sérieux DYNAMILIS a été positionné dans le champ des sciences de l'éducation [45] alors qu'e-GOLIAH est dans le champ de la recherche médicale ce qui imposera des études plus exigeante en termes de démonstration de son utilité [34]. D'autre part concernant l'utilisation des robots avec des enfants autistes plusieurs interrogations sont légitimes. Est-il éthiquement acceptable que des robots sociaux soient utilisés dans le domaine de la santé et utilisés en thérapie avec des enfants autistes ? Est-il éthiquement acceptable d'utiliser des robots sociaux qui remplacent les thérapeutes pour enseigner des compétences aux enfants autistes (par exemple, l'imitation, les compétences sociales) ? Est-il éthiquement acceptable que des robots sociaux soient utilisés en thérapie pour soutenir l'interaction entre le thérapeute et l'enfant autiste ? Est-il éthiquement acceptable que, du fait de leur thérapie, les enfants autistes puissent percevoir les robots sociaux comme des amis ? Plus généralement, est-il éthiquement acceptable de fabriquer des robots sociaux qui ressemblent à des humains ou à

des animaux ? Est-il éthiquement acceptable de faire entrer dans notre imaginaire des créatures artificielles comme certains robots existants appelés NAO ou PROBO [47]. Enfin, l'utilisation de données personnelles en IA posent également les mêmes questions que celles qui se posent en général sur les big data et qui n'ont que partiellement été résolues par les réglementations RGPD. Nous sommes bien conscients qu'au-delà des questions de recherches, les TIC transforment profondément la société et nos comportements. Dans le champ de la psychopathologie, Serge Tisseron résume les défis éthiques précédents à travers une charte déontologique que nous partageons. Elle propose de s'astreindre à respecter au moins 5 points :

- la liberté de chacun qui comprend la question de l'autonomie mais également le respect de l'intimité et de la vie privée ;
- la transparence des algorithmes ce qui implique de pouvoir expliquer simplement à l'utilisateur ce qui est à l'œuvre dans les méthodes d'IA et à quel moment ils sont actifs ;
- l'autonomie de l'utilisateur quant aux choix de dispositifs privilégiant l'interaction sociale et non l'isolement pour prévenir les risques addictifs ;
- la dignité de l'utilisateur en évitant le risque de confusion entre l'homme et la machine, trop fréquente dans les perspectives marketing contemporaines appliquées aux TIC ; l'égalité pour tous dans l'accès au TIC reprenant le principe de justice qui est au cœur de l'éthique européenne [10].

5. Conclusion

Malgré ces défis éthiques, nous sommes convaincus que les TIC et l'IA offrent de nouvelles opportunités de recherches interdisciplinaires dans le champ de la psychopathologie du développement. Des études déjà très convaincantes existent concernant l'utilisation de nouvelles métriques utilisant les méthodes de traitement du signal social. Nous avons repris dans le [Tableau 1](#) les exemples que nous avons détaillés dans ce chapitre en distinguant les différents registres de capture d'information, de contexte, de traitement des données pour mieux appréhender comment l'IA est venu éclairer la question psychopathologique posée.

Pour ce qui concerne les applications thérapeutiques, les jeux sérieux et la robotique sont deux moyens d'investigation différents, même si le premier a atteint des résultats cliniques déjà significatifs. Cependant, l'absence d'études robustes avec une méthodologie solide et souvent l'absence de preuve de généralisation dans la vie courante, ne permettent pas d'évaluer les avantages réels de ces méthodes, en particulier lorsqu'il s'agit d'accompagnement des personnes atteintes de troubles du neurodéveloppement et d'autisme.

Déclaration de liens d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts au regard de cet article.

Références

- [1] Friston KJ, Stephan KE, Montague R, Dolan RJ. Computational psychiatry: the brain as a phantastic organ. *Lancet Psychiatr* 2014;1:148–58.
- [2] Gauld C, Dumas G, Fakra E, Mattout J, Micoulaud-Franchi JA. Les trois cultures de la psychiatrie computationnelle. *Ann Med Psychol* 2021;179:63–71.
- [3] Grossard C, Dapogny A, Cohen D, Bernheim S, Juillet E, Hamel F, et al. Children with autism spectrum disorder produce more ambiguous and less socially meaningful facial expressions: an experimental study using random forest classifiers. *Mol Autism* 2020;11:e5.
- [4] Chaby L, Chetouani M, Plaza M, Cohen D. Exploring multimodal social-emotional behaviors in autism spectrum disorders. workshop on wide spectrum social signal processing. *ASE/IEEE Int Conf Social Comp* 2012:950–4.
- [5] Lucas GM, Rizzo A, Gratch J, Scherer S, Stratou G, Boberg J, et al. Reporting mental health symptoms: breaking down barriers to care with virtual human interviewers. *Front Robot* 2017;4:e51.
- [6] Martin KB, Hammal Z, Ren G, et al. Objective measurement of head movement differences in children with and without autism spectrum disorder. *Mol Autism* 2018;9:e14.
- [7] Tronick E, Weinberg KM. Infant's affective reactions to the resumption of maternal interaction after the still face. *Child Dev* 1996;67:905–14.
- [8] Dumas G, Nadel J, Soussignan R, Martinerie J, Garnero L. Inter-brain synchronization during social interaction. *PLoS one* 2010;5:e12166.
- [9] Weisman O, Zagoory-Sharon O, Feldman R. Oxytocin administration to parent enhances infant physiological and behavioral readiness for social engagement. *Biol Psychiatry* 2012;72:982–9.
- [10] Tisseron S. Charte éthique de l'Institut pour l'étude de la relation homme-robots. In: Tisseron S, editor. *Robots, de nouveaux partenaires de soins psychiques*. Toulouse: Érès; 2018. p. 185–8.
- [11] Cohen D, Viaux S, Saint-Georges C, Leclere 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;200:1203–20.
- [12] Saint-Georges C, Cassel R, Cohen D, Chetouani M, Laznik MC, Maestro S, et al. What studies of family home movies can teach us about autistic infants: a literature review. *Res in Autism Spectr Dis* 2010;4:355–66.
- [13] Saint-Georges C, Mahdhaoui A, Chetouani M, Cassel R, 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.
- [14] Cohen D, Cassel R, Saint-Georges C, Mahdhaoui A, Laznik MC, Apicella F, et al. Parentese prosody and fathers' commitment facilitate social interaction in infants who will later develop autism. *PLoS one* 2013;8:e61402.
- [15] Weisman O, Chetouani M, Saint-Georges C, Bourvis N, Zagoory-Sharon O, Delaherche E, et al. Dynamics of non-verbal vocalizations and hormones during father-infant interaction. *IEEE Trans Affect Comp* 2016;7:337–45. <http://dx.doi.org/10.1109/TAFFC.2015.2478468>.
- [16] 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.
- [17] Scheele D, Striepens N, Güntürkün O, Deutschländer S, Maier W, Kendrick KM, et al. Oxytocin modulates social distance between males and females. *J Neurosci* 2012;32:16074–9.
- [18] Aigrain J, Spodenkiewicz M, Dubuisson S, Detyniecki M, Cohen D, Chetouani M. Multimodal stress detection from multiple assessments. *IEEE Trans Affect Comp* 2016;9:491–506. <http://dx.doi.org/10.1109/TAFFC.2016.2631594>.
- [19] Spodenkiewicz M, Aigrain J, Bourvis N, Dubuisson S, Chetouani M, Cohen D. Multimodal stress detection from multiple assessments. Distinguish self- and hetero-perceived stress through behavioral imaging and physiological features. *Prog Neuro-Psychopharmacol Biol Psychiatry* 2018;82:107–14.
- [20] Bourvis N, Aouidad A, Spodenkiewicz M, Palestra G, Aigrain J, Baptista A, et al. Adolescents with borderline personality disorder show a higher response to stress but a lack of self-perception: evidence through affective computing. *Prog Neuro-Psychopharmacol Biol Psychiatry* (in press) 2021;111:110095.
- [21] Dubowitz H, Bennett S. Physical abuse and neglect of children. *Lancet* 2007;369:1891–9.
- [22] Avril M, Leclère C, Viaux S, Michelet S, Achard C, Missonnier S, et al. Social signal processing for studying parent-infant interaction. *Front Psychol* 2014;5:e1437.
- [23] Leclère 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. *Trans Psychiatry* 2016;6:e816. <http://dx.doi.org/10.1038/tp.2016.82>.
- [24] Meltzoff AN, Kuhl PK, Movellan J, Sejnowski TJ. Foundations for a new science of learning. *Science* 2009;325:284–8.
- [25] Cangelosi A, Schlesinger M. *Developmental robotics: from babies to robots*. The MIT Press, Cambridge MA 2015. <http://dx.doi.org/10.7551/mitpress/9320.001.0001>.
- [26] Asada M, et al. Cognitive developmental robotics: a survey. *IEEE Trans Auton Mental Dev* 2009;1:12–34.
- [27] Nadel J. *How imitation boosts development in infancy and autism spectrum disorder*. London: Oxford University Press; 2014.
- [28] Meltzoff AN. 'Like me': a foundation for social cognition. *Dev Science* 2007;10:126–34.
- [29] Boucenna S, Anzalone S, Tilmont E, Cohen D, Chetouani M, Michelangelo study group. Extraction of social signatures through imitation learning between a robot and a human partner. *IEEE Trans Auton Mental Dev* 2014;6:213–25.
- [30] 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.
- [31] Xavier J, Guedjou H, Anzalone S, Boucenna S, Guigon E, Chetouani M, et al. Toward a motor signature in autism: studies from human-machine interaction. *Encephale* 2019;45:182–7.
- [32] Torres EB, Brincker M, Isenhowe RW, et al. Autism: the micro-movement perspective. *Front Integr Neurosci* 2013;7:e32.
- [33] 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). *Cog Educ* 2017;113:195–211.

- [34] Grynszpan O, Weiss PLT, Perez-Diaz F, Gal E. Innovative technology-based interventions for autism spectrum disorders: a meta-analysis. *Autism* 2014;18:346–61.
- [35] Jouen AI, Narzisi A, Xavier J, Tilmont E, Bodeau N, Bono V, et al. GOLIAH (gaming open library for intervention in autism at home): a 6-month single blind matched controlled exploratory study. *Child Adolesc Psychiatr Ment Health* 2017;11:e17.
- [36] Billeci L, Narzisi A, Tonacci A, Sbriscia-Fioretti B, Serasini L, Fulceri F, et al. An integrated EEG and eye-tracking approach for the study of responding and initiating joint attention in autism spectrum disorders. *Sci Rep* 2017;7:e13560.
- [37] Serret S, Hun S, Iakimova G, 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:e37.
- [38] Dapogny A, Grossard C, Hun S, Serret S, Bourgeois J, Heidy JM, et al. A serious game to teach children with asd how to adequately produce facial expressions. 13th IEEE Int Conf Autom Face Gesture Recognit 2018:51–5 [Le Denmat P, Gargot T, Chetouani M, Archambault D, Cohen D, Anzalone SM. The CoWriter Robot: Improving Attention in a Learning-by-Teaching Setup. 5th Italian Workshop on Artificial Intelligence and Robotics (AIRO@AI*IA)].
- [39] Tordo F, Duris O, Labossière C. Utilisation des jeux vidéo et des robots en psychothérapies. *Une revue de la littérature. Neuropsych Enf Adol* 2022;70:27–36.
- [40] Grossard C, Palestra G, Xavier J, Chetouani M, Grynszpan O, Cohen D. ICT and autism care: state of the art. *Curr Opin Psychiatry* 2018;31:474–83.
- [41] Scassellati B, Admoni H, Mataric M. Robots for use in autism research. *Ann Rev Biomed Eng* 2012;14:275–94.
- [42] Scassellati B, Boccanfuso L, Huang CM, et al. Improving social skills in children with ASD using a long-term, in-home social robot. *Sci Robot* 2018;3:1–9.
- [43] Anzalone SM, Tanet A, Pallanca O, Cohen D, Chetouani M. A humanoid robot controlled by neurofeedback to reinforce attention in autism spectrum disorder. *CEUR Workshop Proceedings* 2017;1834:61–7.
- [44] Asselborn T, Gargot T, Kidzinski L, Johal W, Cohen D, Jolly C, et al. Automated human-level diagnosis of dysgraphia using a consumer tablet. *Npg Digital Medicine* 2018;1:e42.
- [45] Gargot T, Asselborn T, Zammouri I, Brunelle J, Johal W, Dillenbourg P, et al. It is not the robot who learns, it is me” Treating severe dysgraphia using Child-Robot Interaction. *Front Psychiatry* 2021;12:e5.
- [46] ALLISTENE. (Alliance des sciences et technologies du numériques). *Ethique de la recherche en robotique. Rapport de la CERNA, direction Chatila*, 2014. http://cerna-ethics-allistene.org/digitalAssets/38/38704_Avis_robotique_livret.pdf.
- [47] Coeckelbergh M, Pop C, Simut R, Peca A, Pintea S, David D, et al. A survey of expectations about the role of robots in robot-assisted therapy for children with ASD: ethical acceptability, trust, sociability, appearance, and attachment. *Sci Eng Ethics* 2016;22:47–65.

D. Cohen ^{a,*},^bS. Anzalone ^cM. Chetouani ^a

^a *Institut des systèmes intelligents et de robotique, LiLLab, CNRS UMR 7221, Sorbonne université, Paris, France*

^b *Service de psychiatrie de l'enfant et de l'adolescent, AP-HP, hôpital de la Salpêtrière, Paris, France*

^c *Chart EA 4004, Thim, université Paris 8, Saint-Denis, France*

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : david.cohen@aphp.fr (D. Cohen)