Bull. Acad. Natle Méd., 2016, *200*, nº 6, 1203-1220, séance du 28 juin 2016

COMMUNICATION

Intérêts de l'étude des interactions précoces mère-bébé par des méthodes automatisées de traitement du signal social : applications à la psychopathologie

Mots-clés : Relations mère-enfant. Ocytocine. Systèmes d'information

Synchrony, early interaction and psychopathology: relevance for clinical practice and research

Key-words : Mother-Child Relations. Oxytocin. Information Systems

David COHEN *, Sylvie VIAUX, Catherine SAINT-GEORGES, Chloé LECLÈRE, Mohamed CHÉTOUANI, Jean XAVIER

Les auteurs déclarent n'avoir aucun lien d'intérêt en relation avec le contenu de cet article.

RÉSUMÉ

Dans le champ de la biologie et des sciences de l'évolution, l'étude des liens d'attachement s'est vue renouvelée par la découverte de la transmission non-génétique de modes de comportements spécifiques au cours des interactions precoces mères/bébés et du rôle de l'ocytocine. Pour autant, l'étude des interactions précoces est complexe. Nous proposons d'illustrer comment l'utilisation de méthodes computationnelles pour l'analyse et le traitement de signaux sociaux a permis un changement de paradigme. À partir de sources variées (films familiaux ; expériences en laboratoire), nous montrerons comment ces méthodes ont été utilisées (1) pour évaluer la synchronie entre partenaires (bébé, enfant, parent, agent ou robot) en contexte pathologique (autisme, mère négligente) ou non ; (2) pour caractériser les échanges interpersonnels et les signaux sociaux échangés (prosodie émotionnelle, mouvements, vocalisation, tour de parole) ; (3) pour introduire de nouvelles approches comme celle de la robotique développementale.

* Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique, Université Pierre et Marie Curie.
Service de Psychiatrie de l'Enfant et de l'Adolescent, Hôpital de la Salpêtrière, 47-83 Bd de l'Hôpital, 75013 Paris, France ; e-mail : david.cohen@aphp.fr

Tirés à part : Professeur David Cohen, même adresse
Article reçu le 18 février 2016, accepté le 12 mai 2016

SUMMARY

In the field of biology, the study of bonding has been renewed by the discovery of non-genetic transmission of behavioral traits through early mother-infant interaction and the role of oxytocin. Despite maintenance of oxytocin regulation during evolution, social signals that mediate early interaction have evolved dramatically to reach a high level of complexity in human early interaction. Our aim is to show how computational methods and Social Signal Processing (SSP) can help in addressing some issues. Using data from diverse sources (e.g. experiments, home movies) we will show how SSP applied to early interaction was used: (1) to address synchrony between partners (e.g. infant, child, care giver, agent, robot) in pathological context (e.g. autism, maternal neglect) or not ; (2) to measure social signal characteristics that participates to interpersonal exchanges (e.g. motherese, emotional prosody or faces, speech turn taking, motionese) ; (3) to introduce a paradigm shift such as developmental robotics.

INTRODUCTION

L'étude des interactions précoces parents-bébés est contemporaine des premières réflexions sur le développement de l'humain. Les premiers à s'y être intéressés sont les psychanalystes de l'enfant lorsqu'ils ont étudié les effets des séparations précoces [1, 2] ou lorsqu'ils ont intégré dans leur réflexion les travaux de l'éthologie animale et formulé la théorie de l'attachement [3]. L'éthologie animale a montré le besoin d'attachement grâce aux travaux d'Harlow [4] chez le singe et également le phénomène d'empreinte [1] à partir du travail de Lorenz chez l'oiseau [5]. Cette perspective éthologique a validé les méthodes d'observation des interactions précoces. Avec l'avènement des enregistrements vidéo, l'observation s'est affinée via des techniques de cotation vidéo adoptées par la psychologie développementale. Ceci a aussi contribué à découvrir des corrélats pertinents entre activité cérébrale ou physiologique et comportement du bébé ou du parent en situation d'interaction [6, 7]. Pourtant, la part interactive est restée un peu négligée par rapport à l'aspect développement alors que dans un autre contexte, celui des systémiciens de l'école de Palo Alto, ceux-ci ont montré que les interactions en tant que telles étaient un signal social qui ne pouvait se résumer à l'addition des comportements individuels et à leur dynamique. Dans le champ de la psychologie du développement, des travaux plus récents sur la temporalité et la synchronie [7-10] ont permis de réintégrer la dimension dyadique dans l'étude des interactions précoces.

Au plan des transformations sociétales, notre époque contemporaine est aussi marquée par la révolution des technologies de l'information et de la communication. De nouveaux concepts voient le jour : génération Y, monde et espace virtuel,

[1] L'empreinte peut être définie comme la capacité d'acquisition rapide de façon permanente par un juvénile des caractéristiques d'une forme spécifique qui orientera les conduites ultérieures (lien affectif, choix du partenaire sexuel...). Elle permet la mise en place, définitive, d'un lien entre un déclencheur extérieur et un comportement instinctif.

avatars, interactions homme-machine. Dans ce contexte d'ingénierie, de très nombreux outils se sont développés dans l'étude des signaux sociaux qui ont permis de complètement renouveler l'étude des interactions précoces qui est l'objet de cette présentation [9, 11, 12]. Après un rappel introductif sur l'installation des liens précoces dans une perspective évolutionniste, nous présenterons plusieurs travaux utilisant des méthodes automatisées pour extraire les signaux sociaux (vocalisation, regard, sourire...) pendant les interactions précoces, dans des dyades au développement ordinaire ou pathologique, à partir de films familiaux ou de dispositifs plus expérimentaux ; mais aussi dans des dyades en situation de développement pathologique ou d'interactions problématiques en contexte expérimental alors qu'une réflexion pour l'extraction du signal a été proposée pour potentialiser l'utilisation de ces méthodes automatisées. Enfin, nous terminerons en présentant les principes de la robotique développementale c'est-à-dire l'utilisation des robots en interaction avec l'environnement pour tester des hypothèses développementales en proposant un exemple issu de nos travaux sur la reconnaissance de l'autre à partir de l'imitation interactive.

Place de l'espèce humaine dans l'ordre des mammifères

Il parait important de rappeler quelques-unes des caractéristiques de l'espèce humaine dans l'ordre des mammifères, dont l'évolution a favorisé l'émergence. Physiquement la morphologie de l'humain par rapport au singe présente de nombreuses distinctions. Outre la station debout qui a favorisé la libération de l'activité bi-manuelle et la morphologie des mains, on note également la disparition de la pilosité faciale et corporelle qui favorise probablement la prise d'informations au plan de l'expression du visage. Egalement, la taille du cerveau est notablement augmentée, ce qui a certainement favorisé les capacités cognitives de l'humain, tout comme l'apparition du langage et des formes les plus évoluées de communication. La contrepartie de cette station debout et de ce fantastique accroissement de la taille cérébrale, a rendu impossible à un moment donné l'accouchement de bébés au cerveau trop mature du fait des limites physiques de la constitution osseuse du bassin [13]. Ainsi si on devait inférer à partir de la taille de cerveau adulte l'âge du bébé pour une maturité équivalente, l'accouchement devrait avoir lieu vers 21 mois et non pas à 9 mois comme c'est le cas dans l'espèce humaine. Du coup, le cerveau est particulièrement immature à la naissance et continue à avoir des caractéristiques de cerveau fœtal qui poursuit son développement après la naissance. Le bébé humain est donc dans une position de grande dépendance, il se développe lentement, il ne peut pas se déplacer par ses propres moyens, il ne peut pas non plus s'accrocher à sa mère comme ses lointains cousins primates. Certains auteurs font d'ailleurs l'hypothèse que cette nécessaire séparation motrice entre le bébé et sa mère chez les premiers hommes a pu favoriser l'apparition d'un canal audio pour communiquer la détresse du bébé, et donc par là même favoriser l'apparition du langage [13]. Parallèlement, on voit apparaître l'importance des groupes avec un foyer à base communautaire, un partage de l'alimentation et toute une série de techniques pour

obtenir des nutriments qui probablement favorisent à la fois les apprentissages et la mobilité. Par ailleurs, contrairement aux primates, les écarts gestationnels vont se raccourcir alors que la durée de vie s'allonge, ce qui va favoriser, malgré l'augmentation de la dépendance de l'enfant, les familles nombreuses, les entraides entre frères et sœurs ou proches et donc au final, favoriser les apprentissages par proximité, imitation, comportement, et également les héritages culturels [14].

Plus généralement, alors que dans la plupart des espèces mammifères le rôle du mâle est limité à la période de la sexualité et du don de gamètes, l'espèce humaine fait partie des quelques espèces de mammifères où il a un rôle dès les premières années dans la formation du groupe et de la cellule familiale [15]. Enfin, l'humain se caractérise également par sa fantastique capacité de représentation qui trouve son aboutissement dans le développement du langage et des métalangages, soulignant par là même l'importance de la communication et des interactions entre individus de l'espèce humaine. Cette question des interactions entre individus se retrouve dans les notions de liens précoces [2] (« pair bonding » des anglo-saxons [3]) et également dans la diversité des pratiques sexuelles de l'espèce humaine et des conduites amoureuses. Ce bref rappel souligne que d'un point de vue de l'évolution, l'espèce humaine se trouve dans un positionnement évolutif qui rend compte de l'importance du développement précoce d'une part, et des interactions avec ses proches, et son environnement d'autre part.

Caractéristiques des liens d'attachement mère-bébé chez les mammifères

Si l'on reprend dans une perspective évolutionniste comment les relations d'affiliation et la construction des comportements d'attachement s'organisent, on peut retenir les évolutions significatives décrites dans la figure 1 [d'après 14]. A partir des 3 principales caractéristiques des soins parentaux chez les mammifères — à savoir la formation rapide de lien d'attachement, la synchronie comportementale et le lien privilégié d'attachement mère/bébé — Feldman propose d'isoler ce qui distingue l'humain des autres mammifères et comment au cours de l'évolution on passe de conditions d'attachement fondé sur la promiscuité, l'olfaction et le nid chez le rongeur à des conditions d'attachement fondé sur l'exclusivité, la multisensorialité, le partenariat et la culture chez l'humain. Les soins peuvent être définis comme un processus de type trophallaxie — les échanges multisensoriels concourent à l'orientation d'approche et permettent la collaboration en congénères de même espèce — et ils incluent pour l'humain une évolution des comportements parentaux qui ont permis aux phénomènes de synchronie de s'affranchir de l'olfactif et du toucher, donc d'agrandir la distance tout en gardant le lien possible.

[2] On peut définir les liens précoces comme l'ensemble des liens constitués pendant les 2 premières années de vie par un juvénile lors des interactions précoces entre lui-même et ses parents.

[3] Les anglo-saxons ont choisi la notion de « *pair bonding* » qui rend compte tout autant de la constitution des liens précoces que de la faculté pour un adulte de faire lien avec un autre (par exemple dans les échanges amoureux).

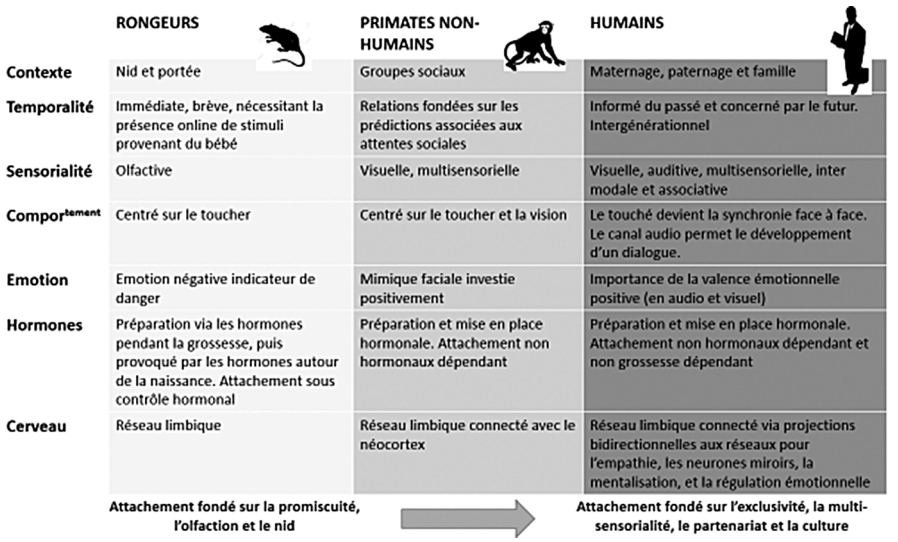


Fig. 1. — Caractéristiques des liens d'attachement mère/bébé chez le rongeur, le primate et l'humain (modifiée d'après Feldman, 2015 [14])

Nous avons ajouté dans cette proposition de Feldman, l'importance à notre sens qu'a pris au cours de l'évolution l'investissement émotionnel positif dans les liens d'affiliation et dans la construction d'un attachement sécure [4]. Chez le rongeur, la valence émotionnelle négative est prévalente et constitue un élément d'alarme déterminant pour le partage du danger et la réponse au stress. Chez l'humain le répertoire des émotions dites négatives est beaucoup plus subtil mais celles-ci restent associées à la peur et au danger. Pourtant on voit chez le singe, que les mimiques faciales existent et peuvent être investies dans un mode de communication non verbale entre congénères et même avec des significations différentes en fonction de la culture du groupe au sein d'une même espèce [16]. Chez l'humain, le fait de pouvoir augmenter la distance des liens précoces est contemporaine de l'apparition d'un canal verbal/audio qui va devenir dès le début des relations précoces mères bébés un mode de communication déjà intentionnelle [9, 17]. Cela permet également à la mère « de poser le bébé » tout en gardant un « œil » auditif sur lui et le signal de détresse devient les pleurs du bébé [13]. Dans le même temps, la mère va développer un mode de parler au bébé dit mammanais qui est une modalité universelle présente dans toutes les cultures et qui est très riche en valence émotionnelle [18]. Nous pensons que cette valence émotionnelle positive joue le rôle d'un amplificateur positif pour la

[4] Le besoin d'attachement d'un bébé s'incarne au cours des interactions précoces entre lui et ses parents. La résultante de ce processus est la constitution d'une confiance de base ou sentiment de soi. Lorsque celle-ci est suffisamment solide, le bébé peut rester seul sans trop s'inquiéter, chercher son parent et le retrouver avec plaisir. On parle alors d'attachement sécure. Dans les cas plus défavorables, la confiance de base est instable et le bébé manifeste détresse, inquiétude, désarroi quand il est laissé seul. On parle d'attachement insécure.

constitution des liens précoces, mais aussi des liens amoureux renforçant par là même les liens intergénérationnels. D'ailleurs, le caractère incarné dans le corps (embodiment au sens anglo-saxon) des émotions et l'apparition de la valence positive au cours de l'évolution dont nous faisons l'hypothèse, est bien rendue par l'opposition peur/stress/agitation et détente/béatitude/relaxation. Côté émotions faciales, on voit au cours de l'évolution comment la perte des poils chez l'homme par rapport au singe va rendre beaucoup plus visibles les expressions faciales dont le paradigme chez le bébé (en opposition aux pleurs) est le sourire. Les échanges précoces sont donc non seulement multi-sensoriels mais également émotionnellement incarnés positivement et/ou négativement.

Rôle de l'ocytocine dans la mise en place des liens d'attachement

La figure 1 montre clairement qu'en fonction des espèces, les signaux sociaux qui vont être échangés par le bébé et le parent au cours des soins précoces, sont extraordinairement variés. Pourtant, l'un des mécanismes de régulation les plus importants dans l'instauration de la parentalité et des interactions précoces, est par contre lui tout à fait bien conservé au cours de l'évolution. Il s'agit des régulations hormonales liées au couple ocytocine/vasopressine [6]. Ainsi, au cours de l'évolution, la modification des signaux sociaux via les stimuli olfactifs est très bien rendue par la dégénérescence des récepteurs à l'ocytocine dans le bulbe olfactif en parallèle du désinvestissement de cette modalité entre insectes et mammifères, et même à l'intérieur de l'ordre des mammifères entre petits mammifères et primates [15].

Malgré les travaux pionniers de Victor Denenberg qui a été le premier à montrer la transmission non génomique de traits comportementaux chez l'animal dans les années 60 [19-20], il faut attendre la fin des années 90 pour voir reprendre ces études à travers les travaux de Michael Meaney et Frances Champagne pour comprendre les effets du stress et des séparations précoces sur le développement précoce. En utilisant des modèles de rongeurs, ces équipes ont montré que les séparations précoces et les soins maternels affectaient le développement des générations futures de rongeurs à travers des effets hormonaux et des modifications épigénétiques. Ces modifications s'avéraient transmises de génération en génération, étaient indépendantes du patrimoine génétique de l'animal lui-même, puisque ces expériences ont été réalisées chez des souris génétiquement clonées. On peut résumer brièvement les points les plus importants que ces expériences ont permis de mettre à jour : 1) les expériences de vie précoces ont un effet à long terme sur le comportement et les systèmes biologiques, en particulier lorsque les mères et leur bébé sont séparés ou quand la qualité des soins maternels varie de manière dramatique [20, 21] ; 2) Certaines expériences précoces peuvent affecter les générations futures, nous proposant un mécanisme non génomique pour la transmission de traits comportementaux [19, 22] ; 3) les comportements peu maternants qui influencent grandement l'épigénèse et les générations futures, peuvent être en partie réversibles si dès la naissance des bébés des générations suivantes on le remet dans des contextes

de lignées de mères maternantes ou si on bloque les mécanismes de marquage épigénétique de l'ADN en utilisant des bloqueurs de l'acétylation des histones juste après la naissance [23] ; 4) les variations naturelles des comportements de maternage (ex. augmentation des léchages du bébé) sont associées avec des différences dans l'expression des récepteurs centraux à l'ocytocine dont on sait qu'ils sont impliqués dans les comportements pro-sociaux [24].

On comprend donc l'importance de l'ocytocine dans l'instauration des liens précoces et des conduites de maternage [25]. L'ocytocine (ou les signaux régulés ou régulant ses variations) intervient à plusieurs niveaux. D'une part, elle prépare les modifications cérébrales et physiologiques liées à la délivrance et aux conduites de maternage. La sécrétion centrale d'ocytocine peut résulter de très nombreux stimuli sensoriels, physiques et physiologiques en partie en fonction de l'espèce (voir plus haut). D'autre part, elle participe à des régulations des comportements interactifs et prosociaux (comportements de maternage, liens d'affiliation, confiance) mais aussi de certains autres grands systèmes comme celui de la douleur et du stress qu'elle tend à diminuer [25].

Le concept de synchronie dans les systèmes interactifs

Les phénomènes de synchronie font le bonheur des photographes animaliers puisque oiseaux ou poissons sont capables de chorégraphie en groupe stupéfiante. Plusieurs définitions de la synchronie entre partenaires ont été proposées dans la littérature sous le registre des concepts de rythme, tour de rôle, réciprocité, affects partagés et interactions harmonieuses [10]. Pour notre part, nous retiendrons la définition proposée par Bernieri et reprise par Feldman dans le champ des interactions précoces. La synchronie est une adaptation dynamique et réciproque des comportements et états émotionnels des partenaires interactifs, d'un point de vue temporel et dyadique [7]. Appliqué aux interactions précoces, plusieurs tentatives de quantification et mesures ont été proposées sous forme de 3 types d'outils : (1) des échelles globales ; (2) des échelles spécifiques à la synchronie ; (3) des micro-annotations associées à des méthodes statistiques spécifiques (corrélations, analyses de récurrence...) [10]. Les études basées sur les annotations ou échelles ont montré que la synchronie est un signal social en soi. Ainsi, une plus grande synchronie interactive entre un bébé et un adulte est associée à une plus grande familiarité (par opposition à un partenaire inconnu), une mère bien portante (par opposition à une mère souffrante), à un développement normal (par opposition à un bébé au développement précoce pathologique) et de manière générale à un développement plus abouti à distance [10]. Les enjeux pour l'application de méthodes d'ingénierie sont (1) la prise en compte au plan computationnel de la dimension dyadique ; (2) la possibilité de tenir compte de la nature multimodale des échanges ; (3) le développement d'outils spécifiques pour extraire de manière précise et automatisée les signaux du bébé et de la mère ; (4) enfin la nécessité de rester inscrits dans la clinique en jeu. Les exemples suivants en sont une illustration.

COMMENT ÉTUDIER LES INTERACTIONS PRÉCOCES AVEC DES MÉTHODES AUTOMATISÉES DE TRAITEMENT DU SIGNAL SOCIAL

L'exemple des films familiaux de bébés ayant développé un autisme

Depuis l'étude princeps de Massie [26] et les travaux pionniers de l'équipe de Tours [27, 28], plusieurs groupes se sont intéressés à l'étude des signes précoces d'autisme à partir du recueil des films familiaux. Bien que rétrospectives et par essence sans procédure permettant des protocoles expérimentaux, 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 de un an. De plus, ils sont souvent non spécifiques de la pathologie lorsque les études comprennent un groupe contrôle de bébés présentant une déficience intellectuelle [29]. On peut retenir néanmoins comme possibles signes précurseurs les troubles du regard social, l'absence de réponse à son prénom, les troubles de l'imitation, l'absence de réactivité, d'intérêt social, de sourire, et une moindre expression d'affects positifs, mais aussi les problèmes de langage, de motricité, de jeu et de développement cognitif [30]. Ils sont pour la plupart, peu sensibles et spécifiques et trop subtils pour la pratique courante [31].

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 (N=15) appariés à des enfants typiques (N=15) et des enfants ayant une déficience intellectuelle (N=12) [32]. 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 synchrone, nous avons déterminé le sens de l'interaction [du parent vers le bébé] mais aussi [du bébé vers le parent]. 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 l'objet et des comportements intersubjectifs.

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 hyper-stimuler son enfant avec des vocalisations riches en prosodie émotionnelle (ou mamanais) et enfin que les pères sont significativement plus présents dans les interactions au 3^{e} semestre comparés aux pères d'enfants normaux [33]. 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 figure 2.

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 (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 s'accentuant au fil des 3 premiers semestres de la vie [32].

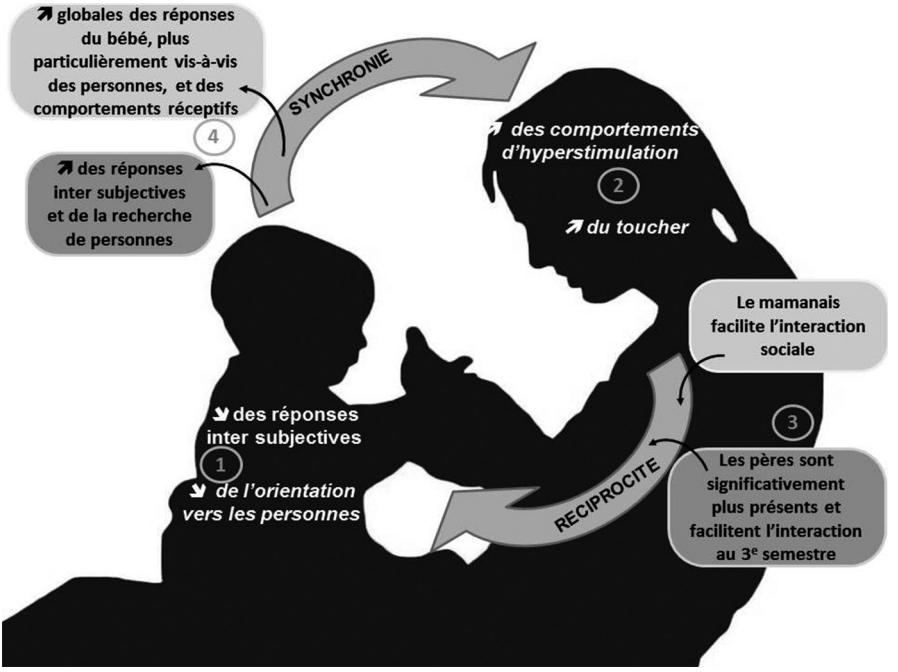


FIG. 2. — Bébés développant un tableau autistique à partir de l'étude des films familiaux : trajectoires pathologiques des comportements du bébé et changements dans les stimulations des parents pour s'adapter à leur enfant.

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 personnes❶. Les parents s'adaptent en utilisant plus de comportements d'hyperstimulation❷ et de toucher❷ (Saint-Georges et *al.*, 2011). 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 mamanais)❸, 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 réceptifs❹. 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 interactions❸. Les vocalisations paternelles vont être associées à plus de réponses intersubjectives et plus de recherche de personne chez les bébés à devenir autistique❹ (Cohen et *al.*, 2013 [33]).

Dans le cadre des études prospectives évaluant le devenir de bébés à haut risque d'autisme (par exemple frères et sœurs d'enfants autistes), la perspective du consortium de l'étude BASIS (British Autism Study of Infant Siblings) est particulièrement intéressante. A l'âge de 6 à 10 mois, 45 bébés à risque et 47 bébés sans risque, puis 43 bébés à risque et 48 bébés sans risque âgés de 12 à 15 mois ont été enregistrés en laboratoire pour 6-min d'interaction libre et cotés en aveugle selon une grille d'interaction. L'interaction semblait affectée par le statut à risque quel que soit d'ailleurs le devenir réel de l'enfant au plan clinique [34], mais toute chose égale par ailleurs, la réciprocité dyadique, la qualité émotionnelle du bébé et l'attention du bébé au parent à 12 mois pouvait prédire le devenir autistique du bébé à risque, alors que les atypicités développementales liées à l'autisme ne le permettaient pas [35]. Dans un autre groupe à risque d'autisme, à savoir les bébés souffrant d'un syndrome de West, la qualité des interactions précoces vers 12 mois s'est avérée aussi prédictive d'une évolution neuro-développementale défavorable [36]. On voit donc que la qualité de la relation au plan de la réciprocité et de l'engagement émotionnel positif du bébé s'avère très importante.

Dynamique motrice et ocytocine

L'équipe de Ruth Feldman a été l'une des premières à montrer de manière formelle 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 [37]. Dans un essai en cross-over où des pères de bébés âgés de 6 mois en moyenne venaient participer à une interaction libre avec leur bambin après avoir reçu en inhalation de l'ocytocine ou du placebo, elle a montré que : 1) lorsque les pères recevaient en inhalation de l'ocytocine, il y avait bien un pic d'ocytocine salivaire mesurable ; 2) 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 ; 3) 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 [38]. Pour explorer par quels mécanismes comportementaux et interactifs était médiée cette augmentation d'ocytocine chez le bébé, nous avons extrait

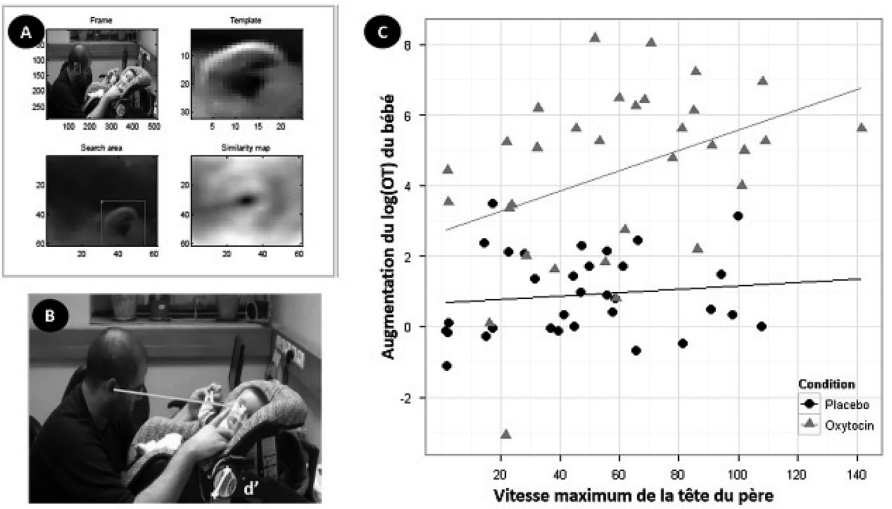


Fig. 3. — Effet d'une inhalation paternelle d'ocytocine (OT) sur les interactions pères-bébés et rôle de la vitesse de déplacement de la tête du père sur l'augmentation d'ocytocine chez le bébé.

Dans cette figure, nous expliquons en A comment nous avons suivi le déplacement de la tête du père en réalisant un suivi automatisé de l'oreille. En 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, normalisée 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). En 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 (Weisman et al, 2013 [40]).

deux types de signaux sociaux lors des interactions filmées, à savoir les vocalisations et tours de parole des partenaires ainsi que la distance relative entre le père et le bébé et ses dérivés, à savoir la vitesse et l'accélération. Si les vocalisations et les tours de parole ne semblaient pas modulés par l'inhalation d'ocytocine chez le père [39], 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 modulés par l'ocytocine. En outre, l'amplitude de cette vitesse pendant l'interaction est extrêmement corrélée à l'augmentation d'ocytocine chez le bébé (figure 2) [40]. Outre le fait que nous savions que les paramètres de proxémie pouvaient être modulés par l'ocytocine, en particulier chez les couples adultes amoureux [41], 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 [40].

ÉTUDES DES DYADES PATHOLOGIQUES EN ANTICIPANT LA CAPTURE DU SIGNAL : LE CAS DES NÉGLIGENCES MATERNELLES SÉVÈRES

La négligence maternelle précoce est une des situations de maltraitance les plus complexes 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 [42, 43]. 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 [44, 45]. 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 [46]. Dans une seconde étude, nous avons enregistré, en utilisant ce dispositif, 20 dyades mère — bébé (âgés de 13 à 36 mois) pendant 4 mn d'interaction libre. 10 dyades étaient considérées à très haut risque psychosocial du fait d'une négligence maternelle 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 de la distance entre les têtes (contribution à la distance des têtes), au focus d'engagement (% de temps passé face à face ou orienté vers la tâche) et à la dynamique des tours de motricité (Ratio de synchronie, Ratio de recouvrement, et Ratio de pauses motrices). Une illustration vidéo est disponible sur le lien suivant [47]. Ces paramètres extraits automatiquement ont été comparés à une cotation experte de l'interaction à l'aide du CIB (Coding Interactive Behavior). Les résultats montrent que les paramètres individuels et dyadiques extraits corrèlent 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 classifier 100 % des dyades. Ces données motrices de bas niveaux sont donc suffisantes pour distinguer dyades pathologiques des dyades contrôles [48].

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 pre-

mière et intégrative pour la seconde qui pourrait permettre d'étudier des corrélats physiologiques contemporains aux interactions [49].

VERS UNE NOUVELLE APPROCHE : LA 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 [50]. 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 [51]. 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 sensé modéliser le développement d'un enfant ou ses apprentissages [52-54]. 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 [55]. 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 [56].

À partir d'une architecture informatique permettant à des robots en interaction avec un partenaire d'apprendre par imitation [57], nous avons implémenté une plateforme robotique humanoïde pour interagir au plan moteur avec des partenaires. Le dispositif robotique produisait aléatoirement des mouvements qui devaient être imités par le 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 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 [58]. 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. Pour ce faire nous avons modifié l'architecture d'apprentissage par imitation en couplant un détecteur de nouveauté dont le réseau de neurones informatiques de sortie était un neurone étiquette pour chacun des partenaires d'interaction.

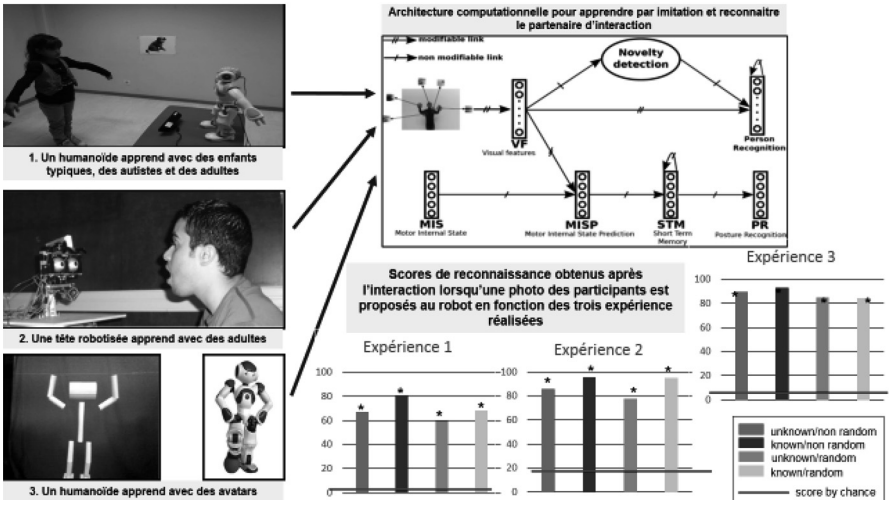


Fig. 4. — Aperçu schématique des expériences montrant l'apprentissage par imitation d'un robot et l'acquisition de la reconnaissance de l'autre pendant cet apprentissage.

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 neurones computationnels et leurs fonctions. 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 (d'après Boucenna et *al.*, 2016 [59]).

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 recognition 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 de photo [59]. Afin de généraliser notre expérience qui avait utilisé la même procédure qu'en [58] 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 [59].

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.

CONCLUSION

L'étude des interactions précoces reste un domaine complexe tant les signaux sociaux sont nombreux, diversifiés et multimodaux. S'il semble que certains mécanismes biologiques soient bien conservés au cours de l'évolution, les comportements d'affiliation sont eux bien différents d'une espèce à l'autre et doivent être étudiés pour chaque partenaire de l'interaction, dans deux directions (du bébé vers le parent ; et inversement) et de manière dyadique comme nous l'avons montré dans plusieurs études. Nous proposons dans le tableau 1 un bref rappel de ce parcours tenant compte des avancées que les méthodes d'ingénierie et d'études des comportements et signaux sociaux nous ont permis (indiqué en italique dans le tableau). Nous pensons que ces méthodes pourraient définir de nouvelles modalités d'investigation des comportements humains que nous proposons de décrire sous l'étiquette « imagerie comportementale » lorsque l'on étudie isolément un sujet ou « imagerie de l'interaction » quand deux ou plusieurs sujets sont étudiés simultanément.

Tableau 1. — Signaux sociaux impliqués dans les liens d'attachement et d'affiliation pendant les interactions précoces parents/bébés

Modalité	Type de signal	Espèce
Du bébé au parent		
Auditive	Vocalisation par ultrason Pleurs Vocalisation	Souris Humain *Humain*
Olfactice	Odeur du bébé	Souris
Visuelle	Regard et contact oculaire	Primate
Physique	Caresse, stimuli au niveau du sein	Primate
Du parent au bébé		
Auditive	Mamanais	*Humain*
Olfactive	Nipple odor	Tous les mammifères
Visuelle	" Motionese " Imiter	Oiseau, *Humain* Humain, *Robot*
Physique	Distance Portage Toucher affectueux	Oiseau Primate *Humain*
Sociale	Synchronie Parentalité partagée	*Humain* *Humain*

Modifié d'après Weisman et *al.*, 2015

RÉFÉRENCES

[1] Freud A, Burlingham DT. Infants without families: Reports on the Hampstead Nurseries, 1939-1945. International Universities Press, NY, 1973.

[2] Spitz RA. Anaclitic depression. The Psycho-analytic Study of the Child. 1946;2:313-342.

[3] Bowlby J. L'attachement. Presse Universitaire de France, Paris, 1978.

[4] Harlow HF, Zimmerman RR. Affectional responses in the infant monkey. S cience 1959;130:421-432.

[5] Lorenz K. Der Kumpan in der Umwelt des Vogels ; der Artgenosse als auslosendes Moment sozialer Verhaltensweisen. J Ornithol. 1935;83(2-3):137-215.

[6] Insel, T.R. The challenge of translation in social neuroscience: A review of oxytocin, vasopressin, and affiliative behavior. Neuron. 2010;65:768-779.

[7] Feldman R. Parent-infant synchrony and the construction of shared timing ; physiological precursors, developmental outcomes, and risk conditions. J Child Psychol Psychiatry. 2007; 48:329-54.

[8] Tronick EZ, Cohn JF. Infant-Mother Face-to-Face Interaction: Age and Gender Differences in Coordination and the Occurrence of Miscoordination. Child Dev. 1989;60(1):85.

[9] Jaffe J, Beebe B, Feldstein S, Crown CL, Jasnow MD. Rhythms of dialogue in infancy: coordinated timing in development. Monogr Soc Res Child Dev. 2001;66(2):1-132.

[10] Leclère C, Viaux S, Avril M, Achard C, Chetouani M, Missonnier S, Cohen D. Why synchrony matters during mother-child interactions: a systematic review. PlosONE 2014;9(12):e113571.

[11] Messinger DS, Mahoor MH, Chow SM, Cohn JF. Automated measurement of facial expression in infant-mother interaction: A pilot study. Infancy. 2009;14(3):285-305.

[12] Hammal Z, Cohn JF, Messinger DS. Head movement dynamics during play and perturbed mother-infant interaction. IEEE Trans Aff Comp (in press)

[13] Falk D. Prelinguistic evolution in early hominins: whence motherese? Behav Brain Sci. 2004; 27:491-503.

[14] Feldman R. The neurobiology of mammalian parenting and the biosocial context of human caregiving. Horm Behav. 2016;77:3-17.

[15] Broad KD, Curley JP, Keverne EB. Mother-infant bonding and the evolution of mammalian social relationships. Philos Trans R Soc Lond Ser B Biol Sci. 2006;361:2199-214.

[16] Thierry B. Identifying constraints in the evolution of primate societies. Philos Trans R Soc B Biol Sci. 2013;368:20120342.

[17] Hauser MD, Chomsky N, Fitch WT. The faculty of language: what is it, who has it, and how did it evolve? Science. 2002;298(5598):1569-79.

[18] Saint-Georges C, Chetouani M, Cassel RS, Apicella F, Mahdhaoui A, Muratori P, Laznik MC, Cohen D. Motherese, an emotion- and interaction-based process, affects infants' cognitive development. PlosOne 2013;8:e78103.

[19] Denenberg VH, Whimby AE. Behavior of Adult Rats Is Modified by the Experiences Their Mothers Had as Infants. Science. 1963;142:1192-3.

[20] Denenberg VH, Rosenberg KM. Nongenetic transmission of information. Nature. 1967; 216:549-50.

[21] Liu D, Diorio J, Tannenbaum B, Caldji C, Francis D, Freedman A, Sharma S, Pearson D, Plotsky PM, Meaney MJ. Maternal care, hip pocampal glucocorticoid receptors, and hypothalamic-pituitary-adrenal responses to stress. Science. 1997;277:1659-62.

[22] Francis D, Diorio J, Liu D, Meaney MJ. Nongenomic transmission across generations of maternal behavior and stress responses in the rat. Science. 1999;286:1155-8.

[23] Weaver IC, Cervoni N, Champagne FA, D'Alessio AC, Sharma S, Seckl JR, Dymov S, Szyf M, Meaney MJ. Epigenetic programming by maternal behavior. Nat Neurosci. 2004;7:847-54.

[24] Champagne F, Diorio J, Sharma S, Meaney MJ. Naturally occurring variations in maternal behavior in the rat are associated with differences in estrogen-inducible central oxytocin receptors. Proc Natl Acad Sci USA. 2001;98:12736-41.

[25] Nagasawa M, Okabe S, Mogi K, Kikusui T. Oxytocin and mutual communication in mother-infant bonding Front Hum Neurosci. 2012;6:e31.

[26] Massie HN. Blind ratings of mother-infant interaction in home movies of prepsychotic and normal infants. Am J Psychiatry. 1978;135(11):1371-74.

[27] Adrien JL, Faure M, Perrot A, Hameury L, Garreau B, Barthelemy C, et *al.* Autism and family home movies: preliminary findings. J Autism Dev Disord. 1991;21(1):43-9.

[28] Adrien JL, Lenoir P, Martineau J, Perrot A, Hameury L, Larmande C, et *al.* Blind ratings of early symptoms of autism based upon family home movies. J Am Acad Child Adolesc Psychiatry. 1993;32(3):617-26.

[29] 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. Research in Autism Spectrum Disorders. 2010;4(3):355-66.

[30] Zwaigenbaum L. Advances in the early detection of autism. Curr Opin Neurol. 2010;23(2):97-102.

[31] Rogers SJ. What are infant siblings teaching us about autism in infancy? Autism Res. 2009; 2(3):125-37.

[32] 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(7):e22393.

[33] 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(5):e61402.

[34] Wan MW, Green J, Elsabbagh M, Johnson M, Charman T, Plummer F. Parent-infant interaction in infant siblings at risk of autism. Research in Developmental Disabilities. 2012; 33(3):924-32.

[35] Wan MW, Green J, Elsabbagh M, Johnson M, Charman T, Plummer F, et *al.* Quality of interaction between at-risk infants and caregiver at 12—15 months is associated with 3-year autism outcome. Journal of Child Psychology and Psychiatry. 2013;54(7):763-71.

[36] Ouss L, Saint-Georges C, Robel L, Bodeau N, Laznik MC, Crespin GC, Chetouani M, Bursztejn C, Golse B, Nabbout R, Desguerres I, Cohen D. Taking into account infant's engagement and emotion during early interactions may help to determine the risk of autism or intellectual disability in infants with West syndrome. European Child and Adolescent Psychiatry. 2014;23(3):143-9.

[37] Feldman R, Gordon I, Zagoory-Sharon O. Maternal and paternal plasma, salivary, and urinary oxytocin and parent-infant synchrony: considering stress and affiliation components of human bonding. Dev. Sci. 2011;14(4):752-761.

[38] Weisman O, Zagoory-Sharon O, Feldman R. Oxytocin Administration to Parent Enhances Infant Physiological and Behavioral Readiness for Social Engagement. Biological Psychiatry. 2012;72(12):982-9.

[39] Weisman O, Chetouani M, Saint-Georges C, Bourvis N, Zagoory-Sharon O, Delaherche E, Cohen D, Feldman R. Dynamics of Non-verbal Vocalizations and Hormones during Father-Infant Interaction. IEEE Transactions on Affective Computing. 2015; DOI:10.1109/TAFFC.2015.2478468.

[40] Weisman O, Delaherche E, Rondeau M, Chetouani M, Cohen D, Feldman R. Oxytocin Shapes Parental Motion Characteristics during Parent-Infant Interaction. Biology Letters. 2013; 9:e20130828.

[41] Scheele, D, Striepens, N, Güntürkün O, Deutschländer S., Maier W, Kendrick KM, Hurlemann R. Oxytocin modulates social distance between males and females. J Neuroscience. 2012; 32:16074-9.

[42] Dubowitz H, Bennett S. Physical abuse and neglect of children. Lancet. 2007; 369(9576):1891-99.

[43] Keren M, Feldman R, Tyano S. Diagnoses and Interactive Patterns of Infants Referred to a Community-Based Infant Mental Health Clinic. J Am Acad Child Adoles Psychiatry. 2001; 40(1):27-35.

[44] Vinciarelli A, Pantic M, Bourlard H. Social Signal Processing: Survey of an Emerging Domain. Image Vision Computing. 2009;27(12):1743-59.

[45] Delaherche E, Chetouani M, Mahdhaoui A, Saint-Georges C, Viaux S, Cohen D. Interpersonal Synchrony: A Survey of Evaluation Methods across Disciplines. IEEE Trans Aff Comp. 2012; 3(3):349-65.

[46] Avril M, Leclère C, Viaux S, Michelet S, Achard C, Missonnier S, Keren M, Cohen D, Chétouani M. Social signal processing for studying parent-infant interaction. Frontiers in Psychology 2014;5:e1437.

[47] https://cloud.isir.upmc.fr/owncloud/public.php?service=files&t=73c96bd42f7c6052a53dd096f3b627b0

[48] Leclère C, Avril M, Viaux-Savelon S, Bodeau N, Achard C, Missonnier S, Keren M, Feldman R, Chetouani M, Cohen D. Interaction and behaviour imaging: a novel method to measure mother-infant interaction using video 3D reconstruction. Translational Psychiatry (in press)

[49] Meltzoff AN, Kuhl PK, Movellan J, Sejnowski TJ. Foundations for a New Science of Learning. Science. 2009;325(5938):284-88.

[50] Cangelosi A, Schlesinger M. Developmental robotics: from babies to robots. The MIT Press, Cambridge MA ; 2015.

[51] Pfeifer R, Lungarella M, Lida F. Self-organization, embodiment, and biologically inspired robotics. Science. 2007;318:1088-93.

[52] Lungarella M, Metta G, Pfeifer R, Sandini G. Developmental robotics: a survey. Connect. Sci. 2003; 15:151-90.

[53] Asada, M. et *al.* Cognitive developmental robotics: a survey. IEEE Trans. Aut. Mental Dev. 2009; 1:12-34.

[54] Asada M. Towards artificial empathy: how can artificial empathy follow the developmental pathway of natural empathy? Int. J. Soc. Robotics. 2015;7(1):19-33.

[55] Nadel J. How imitation boosts development in infancy and autism spectrum disorder. Oxford University Press, London. 2014.

[56] Meltzoff AN. 'Like me': a foundation for social cognition. Dev. Science. 2007;10:126-134.

[57] Gaussier P, Moga S, Banquet JP, Quoy M. From perception-action loops to imitation processes: A bottom-up approach of learning by imitation. Appl. Artif. Intell. 1998;12:701-27.

[58] 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 Transactions on Autonomous Mental Development. 2014; 99:DOI: 10.1109/TAMD.2014.2319861.

[59] 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. Scientific Report. 2016;6:e19908. doi: 10.1038/srep19908.