

Thèse

présentée pour obtenir le diplôme de DOCTORAT en Sciences Cognitives

Développement et modélisation de capacités d'interactions homme-robots : L'imitation comme modèle de communication

Ken PREPIN

prepin@ext.jussieu.fr ken.prepin.free.fr

Soutenue le 28 Avril 2008 devant le jury composé de :

<i>Lola CAÑAMERO</i>	<i>Reader, UH Hertfordshire</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>Olivier GAPENNE</i>	<i>MDC, UTC de Compiègne</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>Paul BOURGINE</i>	<i>Prof., Ecole Polytechnique</i>	<i>Examineur</i>
<i>Jacqueline FAGARD</i>	<i>CR, FRE CNRS 2929</i>	<i>Examineur</i>
<i>Roland JOUVENT</i>	<i>Prof., UPMC Paris 6</i>	<i>Examineur</i>
<i>Didier BAZALGETTE</i>	<i>Responsable métier Facteur Humains DGA</i>	<i>Examineur</i>
<i>Jacqueline NADEL</i>	<i>DR, UMR CNRS 7593</i>	<i>Directrice de thèse</i>
<i>Philippe GAUSSIER</i>	<i>Prof., UCP Cergy-Pontoise</i>	<i>Co-encadrant de thèse</i>
<i>Arnaud REVEL</i>	<i>MDC, ENSEA Cergy-Pontoise</i>	<i>Co encadrant de thèse</i>



Tout ce que je dois et que je ne pourrais pas rendre...

Je tiens à remercier Lola Cañamero et Olivier Gapenne pour l'attention qu'ils ont pris le temps de consacrer à mon travail de thèse en acceptant d'en être les rapporteurs. Je tiens aussi à remercier Paul Bourguine, Jacqueline Fagard et Roland Jouvent d'avoir accepté d'examiner mon travail en se déplaçant à ma soutenance et en participant au jury.

Je remercie Didier Bazalgette, de la DGA, pour m'avoir soutenu et suivi depuis ma candidature pour une allocation de recherche jusqu'au jour de ma soutenance en tant qu'examineur du jury.

Merci à Philippe Gaussier pour avoir participé à mon encadrement, pour avoir toujours été disponible pour discuter, pour avoir su me faire partager sa vision de la cognition et ses principes quant à la manière de faire de la recherche en neurocybernétique.

Merci à Arnaud Revel pour avoir participé à mon encadrement, pour avoir toujours été disponible pour discuter, pour avoir entre autre su m'apprendre ce que tester une architecture veut dire et pour avoir eu la patience de me pousser à le faire.

Merci à Jacqueline Nadel pour m'avoir sagement dirigé tout au long de cette thèse, pour avoir toujours été disponible pour discuter, pour avoir su laisser se développer ma pensée tout en m'évitant de m'égarer, pour m'avoir infusé une part de son savoir et de son expérience, pour m'avoir, finalement, soutenu à bout de bras depuis le début.

Je remercie les directeurs des deux laboratoires dans lesquels j'ai travaillé de m'avoir chaleureusement accueilli, Roland Jouvent au Centre Emotion, et Inbar Fijalkow à ETIS, ainsi que les différents membres de ces laboratoires : les chercheurs, les secrétaires, les ingénieurs, les étudiants, les techniciens et les professeurs. Je remercie en particulier ceux qui m'ont divertit et avec lesquels nous avons «pensé», à la cognition, la société, la vie, la mort et le bonheur : «les filles d'à côté», les boulets, les enclumes et les fillettes, et plus généralement ceux qui le méritent et qui devraient le savoir.

Enfin, merci à mes proches, vous savez, ceux qui savent me rendre heureux, par leur présence et leur attention indéfectibles. Et évidemment, se détachant du lot, je tiens à remercier Caroline, pour un nombre de choses qui ne pourrait être complètement décrit de manière objective et qu'il faut vivre pour concevoir et aimer.

Tout ceci plus moi avons fait émerger cette thèse et travaillons à en faire émerger la suite. Encore merci.

Résumé

Comment modéliser une communication homme-robot intuitive pour l'homme, émergeant en dehors de tout protocole d'interaction ? Nous avons répondu par la modélisation de la fonctionnalité de *communication* de l'*imitation*, où sont présentes les caractéristiques de toute dyade qui communique : *synchronie*, *tour de rôle* et *attention conjointe*.

En soumettant 50 dyades mère-bébé à trois protocoles d'interaction télévisée manipulée techniquement, nous avons contribué à montrer que la *synchronie* informe sur l'état de l'interaction, à la frontière entre la perturbation réciproque et l'enrichissement mutuel. En construisant une dyade de robots, chacun équipé d'un bras et d'une caméra, au sein de laquelle *émerge* un *tour de rôle*, nous avons montré que la *communication* peut-être modélisée comme un couplage de systèmes dynamiques, sans représentation de l'autre. Enfin, en étudiant théoriquement une architecture dédiée à l'*attention conjointe* [Hosoda et al., 2004], nous avons mis en évidence la nécessité, de différencier la chronométrie de ce qui constitue le contexte commun (dans l'imitation c'est l'action) et la chronométrie des micro-signaux régulant l'interaction.

Les robots n'interagissent toujours pas avec les humains de manière intuitive, cependant la voie est ouverte : en développement humain, en développement robotique et en le formalisant, nous avons participé à montrer que la communication est avant tout un couplage et que le contexte commun entre les partenaires de l'interaction se construit par l'interaction elle-même.

Mots clés : Interactions homme-robot - Communication - Imitation - Couplage - Synchronie - Tour de rôle - Attention conjointe - Systèmes dynamiques

Abstract

How can we build a robot which enables human to interact with it in an intuitive way, without requiring any interaction protocol? We suggest an answer modelling the *communication* functionality of *imitation*. Imitation is the simplest way to communicate using the three features of any dyadic system interacting : *synchrony*, *turn-taking* and *joint attention*.

We have tested 50 mother-infant dyads using three designs of televised interaction. Our results suggest that *synchrony* informs about the state of the ongoing interaction, bounding reciprocal perturbation and mutual feeding between agents. We have designed a dyad of robots (each one equipped with an arm and a camera) so as to enable a turn-taking to emerge between them. We suggest that through this emergence *communication* can be modeled as a coupling between dynamic systems, each one of these systems being free from any representation of the other. We have theoretically studied an architecture dedicated to *joint attention* [Hosoda et al., 2004], and we have pointed out that, when a dyad interacts, we have to discriminate between two time scales : one for the sharing of a common context (i.e. *action* for an imitative interaction) and the other dealing with the microsignals regulating interaction interaction.

Robots do not still interact intuitively with humans, but the trend toward this objective is initiated : we have contributed to show in human development, in robotic development and by formalisation, that *communication* is first of all *coupling* and that the context shared by partners is built up by the ongoing interaction.

Keywords : Human-robot interactions - Communication - Imitation - Coupling - Dynamic systems - Synchrony - Turn-taking - Joint-attention

Laboratoires d'accueil

Développement humain

Centre Émotion, UMR CNRS 7593

Bât. Clérembault

Hôpital La Salpêtrière

47, Bd de l'Hôpital

75013, PARIS

Développement robotique

Laboratoire ETIS, équipe Neurocybernétique, UMR CNRS 8051

Université de Cergy-Pontoise, Site St Martin

2, av. Adolphe-Chauvin

95302, Cergy-Pontoise

Pour effectuer cette thèse, j'ai bénéficié du soutien de la DGA, sous la forme d'une allocation de recherche de trois ans.

TABLE DES MATIÈRES

1. Petite introduction	13
1.1 Posons nous la question	13
1.2 De l'utilisation à la coopération : de l'interface au robot social	13
1.3 De l'engin télé-opéré au robot autonome	15
1.3.1 Contrôle en temps réel, l'humain incarne son avatar robotique	15
1.3.2 L'«IA classique» : contrôle différé, un semblant d'autonomie	16
1.3.3 Alter-cognitivisme	22
1.4 Où se situent les robots sociaux ?	33
1.4.1 Classement des robots en fonction de leurs comportements.	34
1.5 Petite communication sur l'interaction.	39
1.5.1 Premier télégramme sur l'interaction	39
1.5.2 L'individu social sous l'œil du microscope.	40
1.5.3 Et si on arrêtait le temps pour mieux étudier l'interaction ?	41
1.5.4 Étudier non pas l'homme en interaction, mais l'interaction elle-même	43
1.6 Imitation : enfance de l'art de communiquer	45
1.6.1 Entendons nous :	45
1.6.2 Le problème de la correspondance un faux débat : l'imitation réciproque une vraie solution.	59
1.6.3 L'imitation comme modèle de communication	61
1.7 Pourquoi « <i>ETIS</i> » et « <i>Vulnérabilité, Adaptation et Psychopathologie</i> » ?	63
2. De l'émergence de la communication	65
2.1 Article1 : multimodalité, synchronie et cohérence de l'individu	69
2.2 Tentative de conciliation entre synchronie inter-individuelle et multimodalité de l'individu	79
2.3 Article2 : Synchronie inter-individuelle vs Multimodalité de l'individu	80
2.4 De la dynamique de l'individu au tour de rôle de la dyade	93

2.5	Tour de rôle	95
2.5.1	Inclination à l'interaction	97
2.6	Article3, Tour de rôle entre robots	99
2.6.1	Bilan sur nos oscillateurs	116
2.6.2	Relation soit-autrui et synchronie	117
2.6.3	L'interaction, attracteur du système mère-enfant	118
2.6.4	Comment la mère et l'enfant se couplent-ils?	119
2.6.5	Détection de mouvement et humain	124
2.7	<i>Autisme</i> et couplage	126
2.8	Communication versus interaction	127
3.	Théorisons et généralisons à propos de la communication	129
3.1	Le «Formalisme des Systèmes Cognitifs»	131
3.2	Article 4 : Formalisation d'une architecture dédiée à l'attention conjointe	135
3.3	Propres actions et actions de l'autre	168
3.4	Reconstruire la dyade en interaction	169
3.5	Formalisation prémonitoire	169
3.6	Échelle de temps de l' <i>échange phatique</i> Vs Échelle de temps de l' <i>action</i>	171
4.	Ce que nous avons fait de ce que nous savions	175
4.1	Trois composantes, trois approches, trois points de vue pour un modèle	176
4.1.1	Étude de la synchronie	176
4.1.2	Étude du tour de rôle	177
4.1.3	Étude de l'attention conjointe	179
4.1.4	Complémentarité	180
4.1.5	En quelques mots...	182
4.2	Premiers pas vers l'interaction homme-robot	182
4.2.1	Extraire les <i>phatiques</i> et le démontrer	183
4.2.2	Ce qu'il y a dans le corps d'ADRIANA	185
4.2.3	Résultats préliminaires	186
4.2.4	Remarques	186
4.3	Apport personnel et contribution	189
4.4	De la suite dans les idées	190

4.4.1	Nouveau paradigme expérimental pour étudier l'interaction sociale chez l'homme	190
4.4.2	Un peu d'apprentissage pour alimenter la communication	192
4.4.3	L'adulte au sein d'une dyade asymétrique	193
4.4.4	Se synchroniser tout en générant de la nouveauté	194
4.4.5	Le robot qui module son interaction avec l'homme	194
4.5	Impénétrables voies de la cognition	195
Bibliographie		197
Annexe		215
A. Pelleteuse		217
B. Le robot qui utilise les signaux phatiques de l'humain		221
B.1	La prédiction du délais	222
B.2	La création du signal de renforcement	225
B.3	L'apprentissage par renforcement retardé	226
B.4	Résultats préliminaires	228

1. PETITE INTRODUCTION

1.1 Posons nous la question

Le plus souvent, les modélisations et les réalisations des roboticiens en matière d'imitation se sont consacrées à sa fonctionnalité d'apprentissage. Les psychologues du développement ont pourtant démontré que l'imitation a une autre fonctionnalité : la communication (Nadel, 1986 ; Nadel & Butterworth, 1999 ; Nadel & Decety, 2002). Cette communication par l'imitation commence chez l'homme dès la naissance. Son caractère pré-langagier et si précoce en fait un mode de communication qui n'utilise aucun protocole d'interaction appris et qui émerge directement des propriétés des systèmes humains. C'est cette émergence de communication en dehors de tout protocole d'interaction que nous ciblons : nous voulons établir une communication homme-robot qui soit intuitive pour l'homme, qui soit robuste et qui permette à l'homme et au robot de bénéficier l'un de l'autre. Et bien sûr, nous espérons non seulement établir cette communication par l'imitation mais surtout en caractériser les pré-requis pour chacun des systèmes en interaction. Pour répondre à notre ambition, trois choses sont nécessaires : construire un modèle de l'interaction, le tester chez l'homme, le tester chez le robot. La nécessité de construire un modèle réside dans notre volonté d'expliquer et d'explicitier les prérequis des systèmes communicants. La nécessité de tester ce modèle chez l'humain d'une part et chez le robot d'autre part est bien entendu liée à notre objectif de faire interagir le robot et l'humain ensemble.

1.2 De l'utilisation à la coopération : de l'interface au robot social

Dans la mesure où nous voulons faire communiquer des hommes et des robots, notre objectif s'inscrit dans le très vaste champ des interfaces homme-machine (IHM) : «En-

semble de dispositifs matériels et logiciels permettant à un utilisateur de communiquer avec un système informatique (qui traite de l'information de manière automatique¹).» [B.O., 8, 1981]. Si la raison d'être d'une IHM est de permettre le contact entre un système et un utilisateur, la nature de ce contact peut prendre des formes fondamentalement différentes [Cooper et al., 1995] :

- L'interface peut refléter la manière dont le mécanisme contrôlé est construit. Cela conduit à des outils très puissants mais complexes et donc destinés à des spécialistes qui savent comment fonctionne la machine à piloter.
- Le comportement de l'interface peut mimer celui d'un objet de la vie courante et donc l'utilisation de l'interface est déjà maîtrisée par l'utilisateur dans la mesure où elle se réfère à l'utilisation de l'objet. Exemple : la notion de document ou de corbeille en informatique.
- Le comportement de l'interface peut être idiomatique, c'est à dire suivre des schémas stéréotypés, cohérents et récurrents qui seront donc facilement assimilables par l'utilisateur sans être nécessairement calqués sur des objets de la vie réelle.

Selon ces définitions, la principale destinée des IHMs est de permettre à l'homme de contrôler une machine, de l'utiliser en tant qu'outil. Elles traduisent cependant une hiérarchie d'autonomie de la machine et de son interface par rapport à l'humain. Si l'interface n'est que le reflet de la machine, alors l'IHM sert uniquement à contrôler la machine et la machine doit être contrôlée tout au long de la tâche. Ainsi les leviers de commande d'une pelleteuse font-ils l'interface entre l'homme et la machine et le nombre de commandes que doit gérer le conducteur est supérieur au nombre de degrés de liberté de la pelleteuse (quatorze degrés de liberté au niveau des commandes sont nécessaires au contrôle d'une pelleteuse qui n'en a que dix, Volvo EC13XR, voir Annexe). C'est l'homme lui-même qui «incarne²» la pelleteuse et dans cette mesure il est complètement impliqué dans la tâche. Mais lorsque l'interface s'abstrait de l'implémentation réelle des

¹ Informatique, (*angl.* informatics) : «Science du traitement rationnel, notamment par machines automatiques, de l'information considérée comme le support des connaissances humaines et des communications dans les domaines technique, économique et social» [Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale, 8, 1981]. Ce qui ressort de l'étude des systèmes, biologiques ou artificiels, qui enregistrent, traitent et communiquent l'information. Ceci comprend l'étude des systèmes neuraux, aussi bien que les systèmes informatiques [Wikipedia, 2007].

² *embody* : s'investir d'un corps dans un environnement (par exemple le monde physique) et ainsi pouvoir y agir et y ressentir (voir *Corps cognitif et cognition incarnée* 1.3.3)

mécanismes contrôlés, comme lorsque sur les voitures modernes un simple bouton fait se garer la voiture, alors on commence à quitter le domaine de la simple utilisation de la machine pour le domaine de la coopération entre l'homme et la machine. La robotique occupe tous les niveaux de cette hiérarchie des IHM et va au-delà en tentant de faire gagner aux robots leur autonomie.

1.3 De l'engin télé-opéré au robot autonome

1.3.1 Contrôle en temps réel, l'humain incarne son avatar robotique

Les robots de téléchirurgie (Zeus en 2001, DaVinci en 2005 ...) sont des interfaces ultra performantes, à la pointe de la technologie en terme de taille, de précision, de maniabilité, de fiabilité et de contrôle à distance en temps réel. À l'heure actuelle l'apport majeur de ces technologie est qu'elles rendent la chirurgie nettement moins invasive que traditionnellement, permettant une limitation des lésions tissulaires et donc diminuant le traumatisme physique lié à l'opération. Mais, de manière encore assez restreinte, le robot peut faire office d'avatar d'un chirurgien distant, par exemple sur terre si le patient est dans l'espace (Raven, courant 2008). Il s'agit bien ici d'interfaces temps réel, ou l'humain contrôle totalement le robot, le robot et l'humain constituent un unique chirurgien et le robot est en fait un nouveau corps pour l'humain qui l'incarne. La part d'autonomie du robot se résume à fluidifier le mouvement du télé-chirurgien, par exemple en supprimant ses éventuels tremblements. Ces robots avatars se retrouvent dans de nombreuses applications robotiques où l'accessibilité à l'homme est limitée, comme à l'intérieur des pipelines, sous l'eau, dans les centrales nucléaires, ou dans le corps humain.

Un autre domaine n'est pas toujours accessible à l'homme et pourrait l'être plus aux robots, c'est celui des interactions sociales avec des personnes ayant des troubles du développement ou des pathologies handicapantes pour les contacts sociaux typiques. Ainsi, certains robots télé-opérés sont destinés à faire l'interface entre ces patients et leur entourage [Kozima et al., 2005, Kozima and Nakagawa, 2007]. Ces robots bien que ne disposant d'aucune autonomie, sont équipés d'effecteurs pour pouvoir interagir dans un contexte social avec l'homme (des yeux, des sons, des expressions) ainsi que de capteurs capables de retransmettre à celui qui pilote le robot les informations sociales liées à

l'interaction (images, sons). Ces interfaces permettent à une personne de communiquer avec d'autres sans être présente mais en étant dans une certaine mesure incarnée.

Notons une forme particulière de ces incarnations d'un avatar par l'humain : les robots dédiés à faciliter les tâches motrices de l'humain handicapé en accompagnant et en soutenant ses mouvements. L'avatar que constitue le robot et l'humain qui le contrôle ne font alors qu'un. En remplaçant le tonus musculaire faisant défaut à l'humain, ils lui assurent une autonomie partielle. Ces robots sont utilisés pour la réhabilitation suite à des attaques cérébrales (MIT-MANUS, Gentle/s, MIME, Phantom ([Johnson, 2006] pour une revue)), et depuis très récemment pour aider les enfants et adolescents du spectre autistique à contrôler leur motricité, se substituant ainsi à l'orthophoniste pour appliquer la technique de communication facilitée de Crossley et Biklen [Oudin et al., 2007]. L'utilisation du robot a l'intérêt de donner de l'autonomie à la personne qu'il assiste de deux manières, d'une part parce que la personne peut faire la tâche sans accompagnateur, et d'autre part parce qu'elle assure la pro-activité du patient qui n'est pas soumis aux initiatives de l'éducateur. Les commandes de contrôle et les effecteurs de ce type de robots ont la particularité de ne faire qu'un, par exemple le bras robotique est à la fois la commande et l'effecteur. L'avatar et l'humain qu'il incarne ne font qu'un, le robot devient ici un moyen pour l'humain déficient de s'incarner lui-même.

1.3.2 L'«IA classique» : contrôle différé, un semblant d'autonomie

Recherche d'autonomie

Dès qu'il s'agit de télé-opérer le robot, d'une part la distance et la qualité de la transmission peuvent rapidement être mises en cause et d'autre part la complexité de contrôle du robot. Ainsi le temps de transmission entre la Terre et Mars varie de 3min à 21min en fonction de leur éloignement. Ceci interdit tout contrôle en temps réel. La solution envisagée alors est de télé-opérer un robot partiellement autonome³ : les robots envoyés sur Mars (Sojourner, Spirit ou Opportunity) sont normalement capables de se

³ autonomie d'un robot : aptitude du robot à passer du temps dans un environnement sans l'intervention de l'homme tout en assurant sa pérennité. L'autonomie peut ainsi être quantifiée en fonction du temps passé seul, et de la variabilité, de la prévisibilité et de la complexité de l'environnement.

déplacer seuls en évitant les obstacles, en prenant des photos du paysage martien et en prenant des échantillons de l'air et du sol. En fait leurs comportement est très lent de manière à ce que, malgré la durée de la transmission, l'homme puisse intervenir depuis la Terre sans craindre de perdre ni le robot ni la transmission.

Le deuxième facteur qui induit la recherche de l'autonomie des robots est la complexité de contrôle du robot. Par exemple, dans le cas d'un visage de robot, le nombre de degrés de liberté peut rapidement augmenter, et pour que le robot puisse proposer à un interlocuteur des expressions faciales émotionnelles en temps réel, que ce soit sur Kismet, Felix, Sparky ou Roboto, celles-ci sont stéréotypées de manière à être facilement reconnaissable, et aucune expression intermédiaire n'est proposée : chaque expression prototypique est pré-programmée [Scheeff et al., 2000, Breazeal, 2002, Cañamero, 2002, Cañamero and Gaussier, 2005, Simon et al., 2007].

Le troisième facteur stimulant la recherche de l'autonomie des robots est le désir de coopération avec le robot plutôt que le simple contrôle. L'idée est de ne pas être complètement investi dans le contrôle du robot et d'être à même de faire autre chose pendant que le robot effectue sa tâche, à plus forte raison si cette tâche est ennuyeuse (robot tondeuse Automower ou Line, robot aspirateur Roomba, robot balayeur RC 3000, robot aspirateur de piscine etc).

Dans le cas cité ci-dessus, du contrôle des expressions faciales d'un robot, le temps durant lequel le robot agit sans le contrôle de l'humain est très réduit : le temps de faire l'expression faciale. Il n'est alors pas d'usage de parler d'autonomie mais plutôt de contrôle. Par contre, l'usage définit certains robots comme complètement autonomes bien que ceux-ci soient dans des environnements familiers et restreints comme par exemple dans un musée (MINERVA, 1998), dans un environnement spécialement équipé (par exemple dans une grande surface, où l'équipement des rayons permet au robot de s'y retrouver), dans une gare (robot guide «I», 2007), ou dans des contextes d'interaction très restreinte («Robota» 2001-07). Dans ces conditions, les robots sont programmés à base de routines qui sont capables de spécifier l'ensemble des comportements nécessaires à évoluer correctement dans l'environnement pour atteindre une tâche désirée.

Il s'agit là de la vision «classique» de l'intelligence artificielle (IA), pointée du doigt par Edelman ou Varela ([Edelman, 1987, Varela, 1989], où l'activité cognitive est vue comme une manipulation de symboles et de règles dans un monde entièrement représenté

par ces symboles et ces règles.

Routines pour l'interaction sociale : modéliser des comportements plutôt que leurs mécanismes sous-jacents

Lorsque l'environnement est social, l'*IA classique* pousse à équiper les robots de protocoles d'interaction, c'est à dire de comportements définis à l'avance pour répondre à différentes situations d'interaction sociales. Par exemple le robot peluche «Paro» de Marti et al. (un petit phoque) est à la fois équipé pour répondre à des stimulations grâce à des routines (ex : si il entend un son fort, il tourne la tête dans sa direction) et à la fois équipé de variables internes qui évoluent au cours du temps, sont influencées par les stimuli externes, et induisent des comportements de la part du robot phoque. Ainsi le robot fait preuve à la fois de «pro-activité» (il génère lui même des comportements) et de réactivité [Marti et al., 2005]. Le robot reste malgré tout contrôlé à base de routines y compris lorsque son comportement est déclenché par ses variables internes : il n'apprend rien sur son environnement, les patterns de comportement sont prédéfinis et en nombre limité.

Sur le même principe de contrôle grâce à des routines, Robota [Billard, 2003, Dautenhahn and Werry, 2004, Robins et al., 2005a] est capable de simuler l'interaction sans toutefois avoir de réelle capacités à construire des références communes avec ses interlocuteurs. Le but de ses concepteurs et utilisateurs, au sein du projet *AURORA*, est bien en fait d'utiliser le robot comme un médiateur de l'interaction. Il constitue alors l'objet animé sur lequel la personne du spectre autistique et son encadrant portent conjointement l'attention et ainsi joue le rôle de facilitateur de la communication entre humains [Robins and Dautenhahn, 2007, Kozima et al., 2005]. Le robot ne remplace ici ni l'éducateur ni le thérapeute, il peut éventuellement aider à l'évaluation des troubles de la communication [Scassellati, 2005a, Scassellati, 2005b], mais contrôlé sur la base de routines d'interaction, ses comportements sont stéréotypés et répétés indéfiniment. L'apport thérapeutique d'une interaction avec un robot ayant de telles limitations doit être mesuré avec précaution [Robins et al., 2005b] en prenant bien garde à ce que ces interactions pré-définies ne soient pas un facteur isolant du monde changeant qu'est le monde social, pour des patients comme les personnes du spectre autistique qui ont tendance à choisir la prédictibilité rassurante de la stéréotypie.

À l'instar de ces robots à visée thérapeutique, des robots dédiés aux interactions

sociales avec l'humain typique sont testés en conditions réelles. Par exemple Kanda et al. ont utilisé et testé avec des enfants de 11 à 12 ans dans un contexte scolaire leur robot *Robovie* [Kanda and Ishiguro, 2005]. En plus des capacités des robots précédents, basées sur des routines, *Robovie* est équipé, selon ses concepteurs, d'une «pseudo-capacité d'apprentissage» qui le fait changer de comportement de manière individualisée. Il s'agit de personnaliser l'interaction avec chaque individu rencontré. La première étape consiste à appeler les élèves par leur prénom, puis plus un élève a interagi longtemps avec le robot, plus la palette de comportements proposés par le robot s'élargit. Cette capacité à avoir une histoire commune avec les individus avec lesquels on interagit est fondamentale pour que l'humain ait la sensation de se trouver en face d'un individu et non en face d'un automate ([Dautenhahn et al., 2002, Fong et al., 2003]). Elle est cependant faite, ici, de manière artificielle, puisque seul le nombre de comportements proposés par le robot dépend effectivement de l'histoire commune. Les comportements eux-même sont tous des routines à la disposition du robot dès le premier instant. La question est alors de savoir si ce type d'apprentissage est suffisant pour donner à l'humain l'impression d'une communication entre lui et le robot. Le robot humanoïde *Robovie* a suscité un intérêt limité chez les élèves. Au bout de quelques (5 à 8) séances d'interactions d'une demi-heure partagées entre 109 élèves, les enfants se sont désintéressés du robot. L'intérêt premier peut être attribué à la curiosité puis le désintérêt à la limitation du robot en terme de comportements.

Bien qu'incapables d'interactions sociales prolongées, ces robots expérimentaux permettent de tester des routines d'interaction, de déterminer comment les complexifier, quelles sont celles qui sont les plus efficaces, qui intéressent le plus, combien il faudrait en ajouter, quels comportements ont un impact majeur sur l'entourage social, quelles sont les variables qu'il semble important de prendre en compte pour interagir avec le monde physique et social. De même des essais sur l'utilisation du langage pour la communication homme-robot tâchent de définir l'ensemble des situations possibles et de définir les routines adaptés. Dans la mesure où le langage devient facilement complexe, pour que les routines couvrent l'ensemble des possibles, le contexte doit être suffisamment restreint et bien défini [Bugmann, 2005]. Ces types de robots sont pré-programmés et ne sont pas conçus pour évoluer et se développer mais pour accomplir de manière efficace et fiable des tâches données dans un environnement spécifique.

Limites liées à un principe de construction

Le principe mis en œuvre pour faire fonctionner de tels robots, que ce soit pour le langage, l'interaction sociale non-verbale ou même l'autonomie du robot dans un environnement défini, est de décrire complètement la tâche cognitive à accomplir, comme parler dans un cadre défini, interagir par imitation, évoluer dans l'environnement, et de mettre à disposition du robot cette description. Nous sommes ici en pleine *IA Classique*, où le postulat de base sur lequel se construit la cognition, est qu'il existe une description symbolique (et sémantique) du monde, objective, qui puisse être extraite de l'environnement par un système bien conçu, et suffisante pour engendrer toute la richesse de comportements que l'«intelligence biologique» peut montrer.

Si l'on tente de décrire objectivement le monde, alors selon [Bierre, 1985] repris par [Varela, 1995], le *monde des échecs* pourrait être décrit par le schéma du haut de la figure 1.1. Ce schéma est interprétable à une échelle unique ou un nombre d'échelles fini et il décrit complètement le monde des échecs, c'est à dire les quelques $2 * 10^{116}$ parties jouables (selon Yakov Perelman (1882-1942)). Par contre si l'on s'intéresse à un monde moins contrôlé, comme par exemple celui de la conduite automobile, toujours selon [Bierre, 1985] et [Varela, 1995], il devrait être décrit par un schéma comparable à celui du bas de la figure 1.1. Ce schéma en tentant de représenter l'ensemble des possibles prend une tournure de fractale, les échelles permettant de le lire ne sont plus en nombre fini et la question est : peut on représenter de manière finie (en arrêtant un jour de compléter le schéma) un monde tel que celui de la conduite automobile, c'est à dire varié et réel ?

Reposons notre question : *«Comment obtenir des interactions entre l'homme et le robot qui puissent se mettre en place indépendamment du contexte, ou plutôt dans des contextes imprévus, sans que le robot ne soit nécessairement familier à l'humain, ni qu'un protocole particulier ne soit nécessaire à l'humain ? La langue, le protocole ou encore la prédéfinition du contexte sont des barrières. Comment s'affranchir de ces obstacles, ou comment faire émerger un protocole au cours de l'interaction elle-même, comment fonder les règles de l'interaction à partir du contexte lui-même ?»*

Nous avons besoin que le robot soit malléable, qu'il puisse évoluer, qu'il se fonde avec le contexte. Le monde social n'est, par essence, pas prédéfini, la cognition qui concerne ce monde social ne peut s'appuyer sur une représentation (figée) de ses propriétés. Si l'on admet que notre problème est de l'ordre du schéma du bas de la figure 1.1 alors,

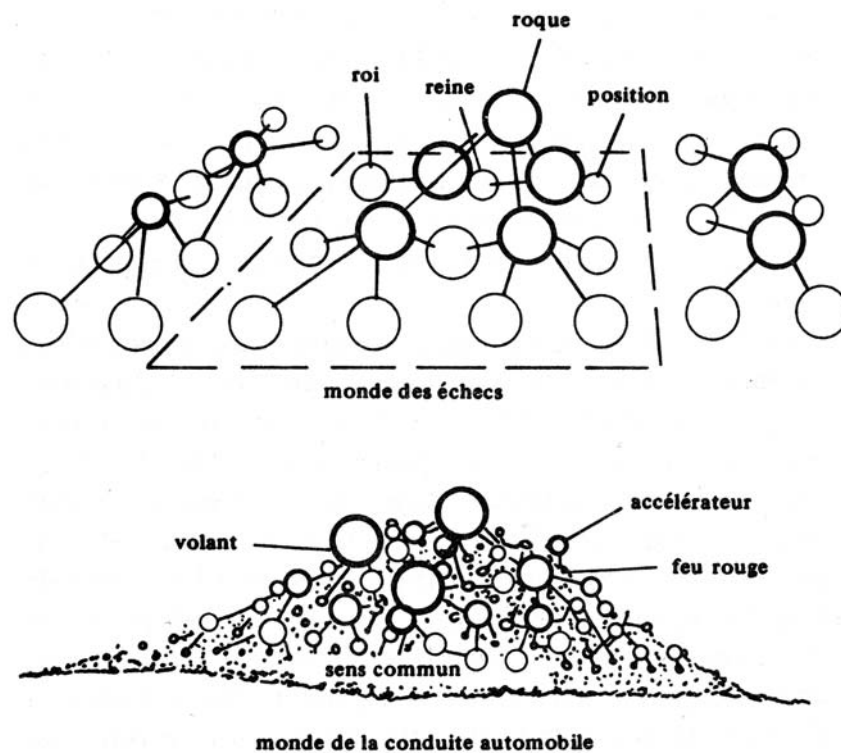


Fig. 1.1: Schéma de Pierre Bierre [Bierre, 1985] repris par Varela [Varela, 1995], illustrant les différentes complexités de représentation du monde en fonction des limites et des règles de ce monde. «Pour l'espace «échecs», il semble possible de dessiner un réseau de relations dont les nœuds représentent chaque élément pertinent. Dans le cas de l'espace «conduite automobile», une semblable tentative montre bien que, au-delà de quelques éléments isolés, le réseau évolue rapidement vers une masse non-circoscrite de sens commun.»

c'est dans l'alternative au «tout n'est que représentation» que l'on se situera.

1.3.3 Alter-cognitivism

«*Embodiment*», «*embeddedness*» et *développement*.

Dernière représentation : lorsque les routines ne suffisent plus, l'*énaction*.

Nous avons cité jusqu'ici des résultats de robotique, où la construction du robot et de son architecture reposent sur une connaissance exhaustive de la tâche que le robot aura à accomplir. Mais, c'est à l'abord de problèmes ancrés dans le monde réel (comme la conduite automobile bien sûr mais à plus forte raison comme l'interaction intuitive entre l'homme et le robot) que les recherches portant sur la capacité des systèmes (biologiques ou artificiels) à évoluer, à s'adapter et à se préserver dans leur environnement, se scindent en deux principaux paradigmes : *cognitiviste* et *connexionniste* [Varela, 1995, Theureau, 1999].

Selon le *paradigme cognitiviste*, la cognition est «le traitement de l'information : la manipulation de symboles à partir de règles». Le monde doit être postulé comme pouvant être décrit par des représentations symboliques de manière objective et univoque, indépendamment du contexte. Les «Sciences Cognitives classiques» (dont l'*IA classique* est un des représentants majeurs) qui se réfèrent à la manipulation de symboles (ayant un contenu sémantique), au traitement de l'information, envisagent «le cerveau comme un ensemble de cellules constamment actives qui reçoit de l'information, la développe et la perçoit, et prend des décisions.».

Selon le *paradigme connexionniste*, la cognition est «l'*émergence*⁴ d'états globaux

⁴ On peut définir l'*émergence* par deux caractéristiques [Wikipedia, 2007] :

- l'ensemble fait plus que la somme de ses parties. Ceci signifie qu'on ne peut pas forcément prédire le comportement de l'ensemble par la seule analyse de ses parties.
- l'ensemble adopte un comportement caractérisable sur lequel la connaissance détaillée de ses parties ne renseigne pas complètement.

À partir d'un certain seuil critique de complexité, ces systèmes voient apparaître de nouvelles propriétés, dites *propriétés émergentes*. Celles-ci deviennent observables lorsqu'elles vont dans le sens d'une organisation nouvelle.

Propriétés émergentes : le niveau microscopique sous-jacent fait *émerger* des formes organisées au niveau macroscopique, lequel influence en retour le niveau microscopique. (RNSC, Réseau National des Systèmes Complexes, 2007).

dans un réseau de composants simples». Il n'est alors pas nécessaire d'avoir de représentations du monde. Un nombre croissant d'auteurs alimentent cette vision de leur travaux. Qu'ils soient philosophes, psychologues, linguistes, neurologues, roboticiens, qu'ils évoquent l'unité du corps et de l'esprit [Merlau-Ponty, 1945], le couplage entre phylo-, onto- et épigénèse [Edelman, 1987, Varela et al., 1993], des dynamiques de boucles sensori-motrices [Cliff, 1990, Gaussier and Zrehen, 1995b, Paolo, 2003], le problème du rapport des représentations à la réalité ⁵ [Harnad, 1990, Ballard et al., 1997, Glenberg and Robertson, 2000], le couplage entre système nerveux, corps et environnement [Pfeifer and Scheier, 1999, Thelen et al., 2001], ils travaillent tous à «replacer l'esprit dans la nature» [Edelman, 1987, Edelman, 1992, Edelman, 2004]. Ils mettent en défaut le «dualisme» entre corps et esprit de Descartes, le «tout est dans le comportement» des béhavioristes, le «tout n'est qu'histoire de symboles» des cognitivistes, et montrent que la cognition est par essence incarnée.

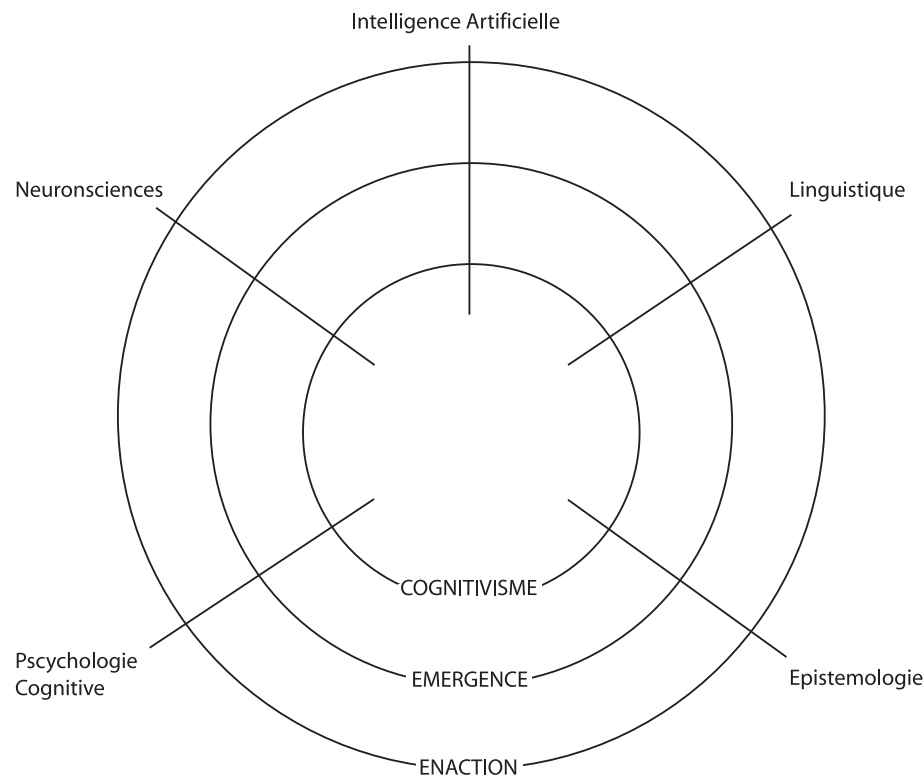


Fig. 1.2: Une carte polaire des Sciences et Techniques de la Cognition, schéma simplifié d'après [Varela, 1995].

Dans cette lignée Varela va plus loin que le *connexionnisme* et l'*émergence* en intro-

⁵ «*Symbol Grounding Problem*»

duisant la notion d'*énaction*. C'est le principe de fonctionnement qui lie les problèmes cités ci-dessus. L'*énaction* permet de définir la cognition comme «l'action productive : l'historique du couplage structurel qui *énacte* (fait-émerger) un monde». Ainsi, il est explicitement postulé que les représentations du monde n'existent pas a priori mais que ce sont des phénomènes émergents du couplage entre différentes entités (elles-mêmes «sélectionnées naturellement» selon leur efficacité dans ce couplage). Les représentations du monde sont alors par nature changeantes et la cognition est le fait même de construire ces représentations, construction qui ne fait qu'un avec le fait de «se comporter», d'agir dans le monde.

L'équipe de Gaussier appréhende ce problème de l'*émergence du comportement* chez un robot en évitant d'utiliser des modèles internes de l'environnement ou des modèles internes des autres agents sociaux. Ils utilisent des principes dynamiques généraux valables pour tous types de systèmes cognitifs, non spécifiques de la tâche. Par exemple le fait que la dynamique d'une architecture tende à limiter les perturbations que cette architecture subit (*homéostasie*) permet à un robot ayant associé des perceptions à des actions [Gaussier and Zrehen, 1995b] d'effectuer différents types de tâches déterminées par la construction (par apprentissage) de l'*homéostat*. Si des vues de l'environnement sont associées à des directions alors, le robot pourra retrouver un lieu («homing», [Gaussier et al., 1997]), ou suivre une trajectoire connue sans carte cognitive [Giovannangeli et al., 2006]. Le robot pourra construire un *homéostat* constitué d'une carte cognitive de transitions (entre lieux) associées à des déplacements (dans des directions spécifiques) et ainsi s'orienter dans un environnement inconnu [Cuperlier et al., 2006].

Dans tous ces travaux il n'y a de modèle ni de la tâche ni de l'environnement. La cognition réside dans le fait que les dynamiques des agents se couplent avec l'environnement et font apparaître des comportements organisés : l'architecture isolée n'a rien de cognitif, elle le devient lorsqu'elle agit dans son environnement par l'intermédiaire d'un corps.

La cognition est une avec la matière et l'action.

Corps cognitif et cognition incarnée

Pourquoi faut-il être incarné ? Avoir un corps c'est d'une part avoir des possibilités dynamiques qui si le corps est bien fait, sont déjà testées, optimisées et prêtes à l'emploi,

et c'est d'autre part pouvoir se déplacer, pouvoir agir et ressentir dans l'environnement.

Depuis le substrat neuronal jusqu'à la conscience, en passant par la morphologie, l'action et l'environnement, tout est étroitement couplé, corps, esprit et environnement sont indissociables. La conscience⁶ n'est pas une entité autonome mais un phénomène émergent des évènements physiques organisés par le biologique. Sans toujours aller jusqu'à la conscience, neurologie, psychologie et robotique s'accordent sur le fait que les capacités cognitives passent par le corps : la cognition de «haut-niveau» émerge de processus sensori-moteurs, c'est à dire qu'elle *énacte* du fait d'avoir un corps et de s'en servir en agissant et en percevant dans l'environnement [Edelman, 1987, Johnson, 1987, Varela et al., 1993, Thelen and Smith, 1994, Pfeifer and Scheier, 1999]. Le corps assure un couplage dynamique avec l'environnement : c'est la rencontre d'entités physiques qui engendre des dynamiques particulières, des comportements.

Corps cognitif Le corps, par les dynamiques qu'il propose, peut assurer une part cruciale d'une part du contrôle moteur et d'autre part du traitement de l'information sensorielle. Chez les vertébrés, le système nerveux central contrôle des mouvements dont les dynamiques sont déjà existantes (comme la marche, mécanisme autonome lié au réflexe myotatique et à l'élasticité musculaire) et les module voire les inhibe plutôt qu'il n'encode finement toute la trajectoire du mouvement [Kandel et al., 2000]. Le corps a donc sa propre dynamique qui, selon Pfeifer, allège drastiquement les capacités cognitives nécessaires au contrôle du mouvement. Ainsi Pfeifer définit *la capacité cognitive du corps* [Pfeifer, 1999]. Cette part de cognition due au corps touche tant à la *perception* qu'à l'*action*.

En ce qui concerne la *perception*, Pfeifer cite Franceschini pour montrer l'impact de la morphologie des capteurs. Les capteurs de l'oeil de la mouche sont plus denses sur l'avant que sur les cotés ce qui uniformise le flot optique perçu (entre facettes voisines) notamment vers l'avant où même de faibles flots seront perçus. Cette morphologie particulière des capteurs a été testée sur des micro-hélicoptère et a permis grâce à un simple rétro-contrôle d'effectuer le décollage, le suivi d'un relief et l'atterrissage [Franceschini, 2004, Franceschini et al., 2007]. C'est la disposition même des facettes qui compense les effets de parallaxes sur le flot optique, et donc qui permet au mécanisme

⁶ il s'agit bien là de la conscience telle que communément entendue, un processus capable d'autoréférence, sentiment d'être là etc

de rétro-contrôle d'être à la fois simple et efficace.

Du côté de l'*action*, c'est la dynamique des effecteurs qui est mise en avant par Pfeifer. «Puppy» est un robot quadrupède dont la particularité est que chacun de ses membres, composé de trois articulations, n'est contrôlé que par deux servomoteurs, la troisième articulation étant elle «contrôlée» par un jeu de ressorts (fig 1.3). La réussite de ce robot est d'obtenir un comportement de course à quatre pattes, faite de bonds successifs, en ayant uniquement recours à un contrôle en position des servomoteurs, contrôle assuré par deux fonctions *sinus* (l'une pour l'épaule et l'autre pour le «coude», correctement déphasées entre pattes avant et arrière). Le contrôle explicitement implémenté (celui des servomoteurs) est minimaliste et ne contient aucune boucle de rétro-contrôle qui permettrait de l'adapter notamment aux déséquilibres du robot lors de la course. Ce rétro-contrôle est en fait obtenu par l'effet d'amorti-détente des ressorts qui fait que chacun des membres en interaction avec le corps et le sol fait tendre le robot vers un état stable (les quatre pattes vers le sol). Iida et Pfeifer (2004) notent que, étant donnée la vitesse de mouvement des membres du robot, une boucle de rétro-contrôle classique tiendrait difficilement le temps réel nécessaire à la stabilité du robot. Ils énoncent aussi

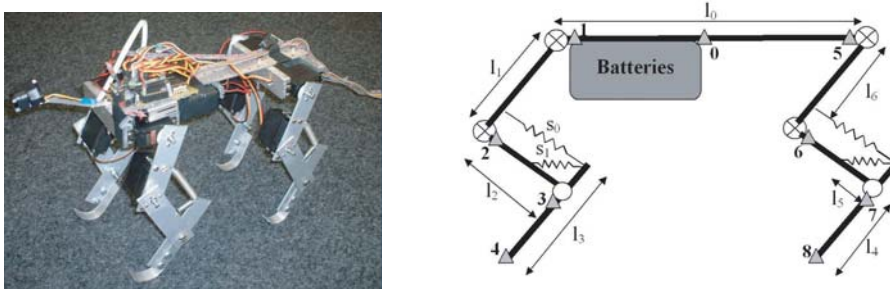


Fig. 1.3: À gauche : une photographie du robot quadrupède. À droite : Un schéma du robot. Les cercles marqués les articulations passives et les cercles marqués d'une croix marquent les articulations contrôlées par des servomoteurs. Les triangles avec un numéro montre la localisation des LEDs permettant de tracer la géométrie du corps lors des expériences de locomotion. Les l marquent les longueurs des segments rigides du corps tandis que les s marquent les forces des ressorts reliant certains de ces segments. Repris et traduit de [Iida and Pfeifer, 2004]

le problème de «*shaping*» lors de la prise d'objets par une main robotique. Si les arti-

culations des doigts de la main robotique font preuve d'une certaine élasticité, alors le problème de la configuration que doit prendre la main pour saisir l'objet est en grande partie réglé : les doigts s'adaptent «d'eux-mêmes», c'est à dire grâce à leurs propriétés élastiques, à la forme de l'objet.

Cognition incarnée Comment relier des associations internes à un système, ou des dynamiques internes, à ce qui est extérieur au système, au monde réel ? C'est en fait la question que pose le «*symbol grounding problem*» (problème de l'ancrage des symboles, dans le monde physique) à propos d'un système de symboles. L'illustration de ce problème donnée par Harnad en est la suivante : si un Français qui ne parle pas le Japonais arrive dans un aéroport au Japon et voit un mot écrit, il pourra toujours en chercher la signification dans un dictionnaire Japonais-Japonais mais il ne pourra jamais faire de lien entre le système de symboles que lui propose le dictionnaire et la signification de la pancarte dans le monde physique [Harnad, 1990, Glenberg and Robertson, 2000]. Le problème décrit n'est pas lié au fait qu'il s'agisse d'un système de symboles mais bien au fait que le système boucle sur lui-même ou pas. Si l'on admet que la cognition est un phénomène émergent, c'est à dire que l'interaction d'entités microscopiques engendre des formes organisées à un niveau macroscopique, lesquelles formes influencent en retour le niveau microscopique, alors la cognition est un dictionnaire Japonais-Japonais sans cesse réécrit, qui si il ne parle que de lui et jamais du monde perçu par le Français dans l'aéroport, ne deviendra jamais un dictionnaire Français-Japonais.

Le fait est que le monde est changeant : le couplage doit être permanent, un système symbolique ou un autre système ne peuvent se régénérer et donner du «sens» aux processus fonctionnant à l'intérieur du système qu'au travers d'un «ancrage dans le monde physique⁷». Le monde est changeant, un système adapté au monde ne peut se contenter de cette adaptation, il doit être en permanente réadaptation [Brooks, 1991]. L'épigénèse, la construction de représentations, le développement adapté à l'environnement, la réadaptation liée à des variations de l'environnement, sont établis à partir des relations sensori-motrices que le corps en interaction avec l'environnement génèrent. La cognition est incarnée. Selon [Bourgine and Stewart, 2004], la cognition n'est pas seulement le rebouclage entre propriétés émergentes et entités sous-jacentes d'un système complexe, mais bien l'acte de survivre dans le monde réel, et donc par définition, parmi

⁷ *physical grounding*

les entités sous-jacentes du système complexe, il doit y avoir ce monde réel. Un problème plus profond est «peut-il exister un esprit désincarné?». De nombreux auteurs pensent que la cognition est ancrée dans l'expérience du monde physique. Par exemple Johnson (1987) prétend qu'une grande partie de notre langage est en fait en relation avec notre connection physique au monde. Nos «concepts» sont basés sur des expériences du monde physique [Johnson, 1987]. [Smith and Thelen, 2003] suggèrent que sans l'ancrage dans le monde physique, il ne pourrait y avoir aucun frein à la régression (retour à un état désorganisé) au sein d'un système.

Ce monde qu'est le monde réel, en particulier s'il est social, est un monde changeant dont les dynamiques respectent certaines règles, lié notamment à la matière le constituant. Avoir un corps dans le monde réel c'est avoir certaines contraintes dynamiques, notamment temporelles qui permettent de mieux se coupler au monde réel [Ballard et al., 1997]. Les interactions entre les différentes entités du monde réel se font grâce à des phénomènes physiques, gravité, répartition des concentrations dans les liquide, fusion de certaines molécules etc. Même si on peut extraire de ce monde une certaine organisation et l'évoquer grâce à des symboles, pour entrer en interaction avec ce monde, les symboles ne suffisent plus, il faut utiliser ces phénomènes physiques. La réponse est alors le corps. Avoir un corps, c'est être un système physique dans le monde physique. C'est donc se doter d'une capacité de couplage avec le monde physique, s'offrir la possibilité d'avoir des dynamiques particulières, celles du monde, qui interagissent avec les notres.

La cognition dépend du couplage avec le monde, ce couplage dépend des dynamiques du corps par rapport aux dynamiques du monde. Le robot cognitif ne saurait être conçu en dehors des dynamiques du monde réel dans lequel il sera plongé.

Systèmes dynamiques bien faits, couplés au monde réel... vers la cognition

Embeddedness, situatedness

Fong et al. (2003) définissent l'*embodiement* comme «ce qui établit une base pour un *couplage structurel entre système et environnement en créant la possibilité de perturbations mutuelles entre ce système et l'environnement* » (tiré de [Fong et al., 2003] et traduit). Ce «couplage structurel entre système et environnement» est l'*embeddedness* du système, c'est à dire son «ancrage» dans le monde réel.

Cette définition de l'*embeddedness* d'un agent va plus loin que le simple fait de lui

attribuer un corps, elle pointe l'influence réciproque susceptible d'exister entre cet agent et son environnement. C'est d'une part l'aptitude des capteurs à transmettre à l'agent l'information provenant de l'environnement et d'autre part l'aptitude des effecteurs de l'agent à transmettre à l'environnement l'information provenant de l'agent (à modifier l'environnement). Étant donné un corps particulier, un *embodiement*, ces deux aptitudes sont étroitement liées à l'environnement dans lequel est plongé le corps. En effet, du point de vue des capteurs, des vibrisses transmettent plus d'information sur son environnement à l'animal rampant qu'à l'animal volant, de même, un système visuel transmet plus d'information sur son environnement à un animal diurne qu'à un animal cavernicole. Du point de vue des effecteurs, l'efficacité dépend à la fois du type d'environnement auquel ils sont destinés et du type d'environnement dans lequel le corps est plongé :

«L'albatros

[...]

À peine (sont ils) déposés sur les planches,
 Que ces rois de l'azur, maladroits et honteux,
 Laissent piteusement leurs grandes ailes blanches
 Comme des avirons traîner à côté d'eux.

Ce voyageur ailé, comme il est gauche et veule !
 Lui, naguère si beau, qu'il est comique et laid !

[...]

L'autre mime, en boitant, l'infirmes qui volait !

[...] prince des nuées

Qui hante la tempête et se rit de l'archer
 Exilé sur le sol au milieu des huées,
 Ses ailes de géant l'empêchent de marcher.»

Charles Baudelaire, *Les fleurs du mal II*

Pour un même *embodiement*, l'*embeddedness* de l'albatros est plus forte lorsqu'il est dans les airs que lorsqu'il est «exilé» à terre : l'albatros et le vent «modèlent un monde

commun au moyen d'une action conjuguée» et font *émerger* des dynamiques particulières (dans «la tempête» ou face à «l'archer») qui permettent la survie de l'albatros tandis que l'albatros et le sol se limitent à l'immobilité ou à une marche difficile et instable.

Cette définition fait ressortir l'aspect de couplage existant entre l'agent et son environnement. Si l'environnement contient d'autres agents, autonomes, susceptibles de s'influencer les uns les autres, alors il est d'autant plus propice à des couplages réciproques : l'*embeddedness* de l'agent dans cette environnement est alors une mesure directe de son caractère social, de sa capacité de couplage avec un certain environnement social. Cette définition de l'*embeddedness* permet de définir l'agent social comme un agent socialement *embedded* et donc surtout comme sensible et actant d'un environnement social avant de le définir comme socialement cognitif.

En fait lorsque Fong et al. (2003) énoncent cette définition, ils citent un de leurs papiers précédents [Dautenhahn et al., 2002] dans lequel ils définissaient la qualité du lien existant entre l'environnement et le corps comme l'*embodiment* et non comme l'*embeddedness* : plus un système était couplé à son environnement (par l'intermédiaire de ses capteurs et de ses effecteurs), plus le système était *embodied*. L'*embeddedness* est effectivement dépendante de l'*embodiment* mais l'on différenciera la base du couplage, c'est-à-dire le fait d'avoir un corps doté de propriétés dynamiques et physiques particulières, et les propriétés du couplage lui même, c'est-à-dire la relation que ce corps et l'environnement sont susceptibles d'établir, qui elle, est liée en plus à la spécificité de l'environnement.

L'*embodiment* est le médium par lequel l'agent peut être structurellement couplé à l'environnement. L'*embeddedness* est le couplage résultant de l'interaction de ce médium avec un environnement particulier.

Notons que malgré cette distinction, les senseurs et les effecteurs sont souvent présentés comme LES éléments déterminant de l'*embeddedness* d'un agent dans un environnement [Dautenhahn et al., 2002]. Or suivant le traitement qui est fait du signal récupéré des capteurs, l'influence de l'environnement sur l'agent change et de ce fait l'action que peut avoir l'agent sur l'environnement. Ainsi, les capacités cognitives de l'agent font partie intégrante de sa relation à l'environnement et vont être à l'origine de la capacité de couplage de l'agent à son environnement : le corps et l'«esprit» sont étroitement liés. Contrairement à la mode actuelle qui est à la complexification des robots en terme de capteurs, la complexification du système cognitif qui contrôle le robot peut être à la source

d'une amélioration de l'*embeddedness* : Des *embodiement* différents peuvent conduire à des *embeddedness* comparables grâce à l'architecture de contrôle qui donne au robot ses capacités de couplage avec l'environnement indépendamment de l'*embodiement* [Gaussier and Zrehen, 1995b]. L'architecture du robot est alors aussi cruciale que son *embodiement* pour que le robot ait une *embeddedness* forte dans l'environnement.

Développement

Quelle que soit l'approche, routine, langage, systèmes dynamiques, est-il possible de construire un robot qui ait dès sa mise en route les capacités d'interaction que peut avoir un adulte «expert» (par exemple un parent ou un thérapeute)? En d'autres termes, le développement est-il nécessaire? En fait, si l'on copie exactement l'architecture d'un robot s'étant développé dans un clone de ce robot, le clone sera-t-il capable des mêmes performances que l'original? Il est prématuré de répondre à cette question. Cependant, il est clair que si un robot n'est pas à-même de s'adapter au changement, et donc dans une certaine mesure de continuer à se développer, alors il ne pourra se construire une cognition en agissant et en percevant dans le monde, passant à coté des notions de couplage, d'émergence et d'ancrage dans le monde réel.

En 2001, Weng et al. répertorient, au cours de l'histoire de la robotique, trois approches ayant pour but de concevoir des «machines intelligentes» [Weng et al., 2001]. La première, basée sur le savoir («knowledge based»), consiste à programmer explicitement le système pour qu'il effectue la tâche désirée : il s'agit d'*IA classique* telle que nous l'avons évoquée, d'une téléopération différée du robot. La seconde, basée sur l'apprentissage, consiste à donner au robot contrôlé par un programme d'apprentissage de tâches, des données sensorielles sélectionnées et arrangées par l'humain. La troisième, basée sur la sélection des robots en fonction d'un critère d'*adaptation* («fitness»), consiste à laisser le hasard et la sélection engendrer par générations successives des systèmes de contrôles adaptés à des tâches spécifiques. Weng et al. annoncent dans leur article la naissance à la suite de ces trois approches, d'une quatrième, le *développement mental autonome* («*autonomous mental development*»). Le développement et l'apprentissage du robot ne sont alors pas explicitement programmés mais sont plutôt des phénomènes émergeant de l'organisation du robot, des dynamiques qu'il propose et du couplage de ces dynamiques avec l'environnement. Il s'agit là d'utiliser l'*énaction* pour se développer.

Ainsi, Andry et al. (2004) et Maillard et al. (2006) utilisent l'existence, parmi les

comportements possibles du robot, de dynamiques particulières qui laissent certaines perceptions invariantes. Dans [Andry et al., 2004] c'est l'association entre perception visuelle et proprioception du robot qui sont laissés invariants par les dynamiques du robot. Ce sont alors ces dynamiques qui sont apprises. Dans [Maillard et al., 2006], une première dynamique laisse invariante par translation l'image autour de la fovéa («tracking visuel» par une caméra pan). Ainsi si le robot se déplace à proximité d'un objet, l'objet reste immobile sur l'image captée par le robot. Une deuxième dynamique effectue des *séquences de focalisations* dans l'image reçue par la caméra (objet + arrière-plan). Bien que ces deux dynamiques soient indépendantes, leur association fait émerger des *séquences de focalisations*, un sous ensemble invariant qui exclue l'arrière plan de l'objet suivi et qui caractérise une *vue de l'objet*. C'est cette perception invariante de la vue de l'objet (un sous ensemble d'une séquence de focalisation) qui est apprise. Une troisième dynamique fait se déplacer le robot autour d'un objet. Cette troisième dynamique associée aux deux précédentes induit une succession de vues caractérisant l'objet. Cette succession invariante de vue de l'objet peut alors être apprise en accord avec les actions liées au-dit objet (ici, en faire le tour). Notons qu'outre la complexification des caractéristiques apprises d'un objet grâce à la combinaison de dynamiques et des invariants qu'elles suscitent, la caractérisation d'un objet se fait en fonction des actions liées à cette objet : le monde est caractérisé par son affordance [Maillard, 2007].

Nous avons jusqu'ici évoqué le *développement* comme étant le fait que le robot part d'un certain nombre d'aptitudes qu'il a dès sa mise en route, de manière «innée» si l'on fait référence au développement humain, et qu'il en acquiert d'autres plus complexes qui se basent sur les premières et qui ne seraient pas accessibles au robot si les premières n'étaient pas déjà acquises. On pourra parler de différents stades de développement [Revel and Nadel, 2007].

Mais une autre nécessité majeure pour le robot autonome est son adaptation permanente aux changements de l'environnement. Si le robot module les compétences acquises pour s'adapter à son environnement, on pourrait parler de développement permanent du robot bien qu'aucune compétence de complexité supérieure à d'autres ne soit acquise. C'est en cela que certains travaux sont notables, dans le fait que les phases d'apprentissage ne sont pas dissociées du reste de l'évolution du robot. Le robot est en ligne en permanence, il apprend en permanence. Par exemple dans [Andry et al., 2002d] si le robot a appris les associations entre proprioception et vision, alors, si on lui remplace

le bras par un nouveau, il est incapable de reconstruire les associations dans la mesure où les phases d'apprentissage et d'exploitation de cet apprentissage sont dissociés. [Kaplan and Oudeyer, 2007, Blanchard and Cañamero, 2007] proposent deux solutions pour que ces phases d'apprentissage versus exploitation émergent d'une dynamique interne du robot .

Les «interfaces» ayant un développement, les robots qui apprennent, se différencient des autres dans la mesure où l'on ne connaît pas a priori l'évolution et les limites de leur comportement. Ceci est d'autant plus marqué lorsque l'environnement est social, c'est-à-dire interactif : les robots sociaux constituent une classe particulière de robots à développement autonome.

1.4 Où se situent les robots sociaux ?

La simple évocation de «robots sociaux» fait surgir de la communauté scientifique tant les modélisateurs travaillant sur le langage, les concepteurs d'intelligences artificielles à base de routines, les concepteurs de modèle incrémentaux, les thérapeutes en espérance de robots comme nouveau média de communication, les thérapeutes en espérance de robots capable de faire des soins à domicile, au service des patients, les psychologues en quête de validation de leur modèle, les philosophes sociologues qui s'intéressent à l'acceptation des robots par l'homme, que les modélisateurs en sciences cognitives qui y voient l'implication de clefs nécessaires à la cognition. S'il est vrai que tous ces domaines tentent de mettre en jeu des robots dans un contexte social, ils n'ont pas tous pour objectif de parvenir à une coopération entre l'humain et le robot où le robot est aussi actif que l'humain dans l'interaction et où l'humain peut tirer profit de l'interaction.

En fait, certains auteurs (Dautenhahn, Billard, Fong etc) parlent de robots sociaux dès que les robots sont amenés à entrer en contact avec les hommes. S'il est vrai que leur conception requiert de s'intéresser aux mécanismes mis en jeu dans les interactions sociales, de tels robots ne sont pas forcément des agents autonomes et capables d'*énacter* l'interaction.

Où se situe la frontière entre *contrôle* et *interaction sociale* ? Plus l'on va vers la coopération, plus la machine est autonome, c'est à dire plus elle peut faire de tâches sans avoir le secours de l'humain et donc plus l'échange entre la machine et l'humain apporte d'information et d'aide à l'humain et plus l'on se dirige vers une *interaction*

sociale.

1.4.1 Classement des robots en fonction de leurs comportements.

C'est dans ce même état d'esprit où le comportement, la faculté à résoudre une tâche donnée, prime sur le mécanisme permettant le contrôle du robot que d'abord Breazeal puis Fong et al. ont défini des classes de robots sociaux de complexité croissante [Dautenhahn and Billard, 1999, Breazeal, 2003, Fong et al., 2003].

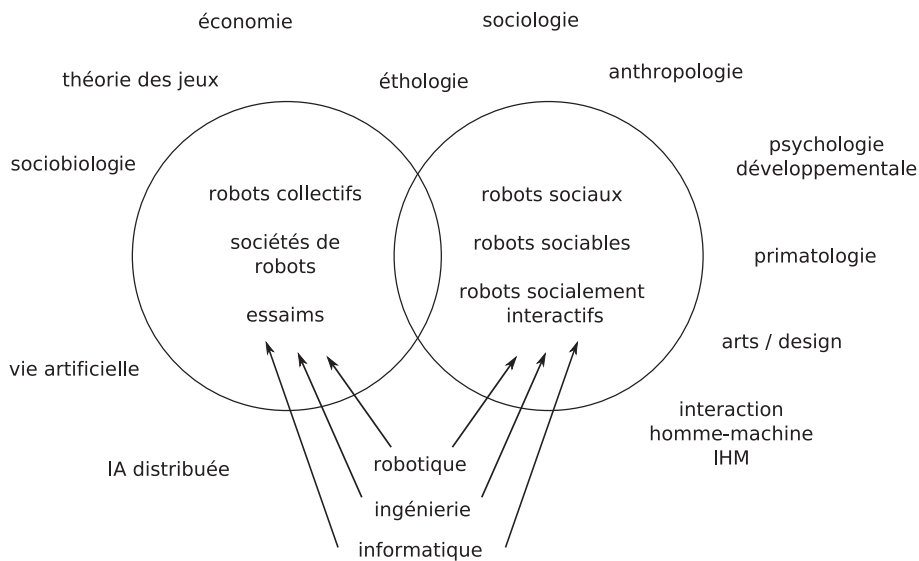


Fig. 1.4: Domaines majeurs. Notons que les «robots collectifs» et les «robots sociaux» se recouvrent là où la singularité des individus joue un rôle moindre (tiré, traduit et retranscrit de [Fong et al., 2003]).

Définition du «Robot Social» : les robots sociaux sont des agents incarnés faisant partie d'un groupe hétérogène : une société de robots ou d'humains. Ils sont capables de se reconnaître les uns les autres et de s'engager dans des interactions sociales, ils ont chacun une histoire (ils perçoivent et interprètent le monde en fonction de leur propre expérience), ils communiquent explicitement les uns avec les autres et apprennent les uns des autres.

Bien entendu, cette définition constitue la définition d'un objectif plus qu'un compte rendu de l'existant, notamment si l'on observe que des capacités cognitives telles que la

reconnaissance, le *développement* et l'*apprentissage* ne sont pas spécifiques de l'interaction avec le *monde social* mais plus généralement concernent l'interaction avec le *monde physique*.

Breazeal (2003) propose quatre classes de robots sociaux, nous considérerons plutôt les deux premières comme des interfaces et les secondes comme robots sociaux :

- «*Socially evocative*» ou déclencheur de comportement sociaux. Les robots de cette classe sont construits de manière à générer chez l'homme de la sympathie vis à vis du robot, c'est à dire un certain attachement et une certaine empathie , ceci notamment en rendant artificiellement le robot très dépendant des contacts sociaux (ex : les «tamagoshis», le robot «Keepon» de Kozima).
- «*Socially communicative*» ou interface anthropomorphe. Les robots de cette classe sont des avatars de personnes, et servent soit à les remplacer dans des contextes particulièrement restreints (ex : musée) soit d'interface à une personne pour communiquer avec d'autres sans être présent mais en étant dans une certaine mesure incarné. Ce type de robot est pré-programmé et n'est pas conçu pour évoluer et se développer mais pour accomplir de manière efficace et fiable une tâche donnée.
- «*Socially responsive*» ou étant intrinsèquement modifiés par le contact social. Il s'agit des robots susceptibles d'apprendre grâce à un contact avec l'humain, comme par exemple par imitation [Demiris and Hayes, 1996, Atkeson and Schaal, 1997, Schaal, 1997, Breazeal et al., 2005] ou encore dans un environnement adapté, modelant et soutenant le comportement⁸ [Saunders et al., 2006, Saunders et al., 2007]. Les robots de cette classe sont sensés évoluer dans leur manière d'interagir et entretenir des rapports particuliers avec chacun de leurs interlocuteurs en fonction d'une histoire partagée avec ces interlocuteurs.
- «*Sociable*» ou complètement intégré en tant qu'individu social, avec ses propres buts et ses propres particularités. Ils seraient sensés s'engager pro-activement dans l'interaction, non seulement pour aider l'humain à accomplir une tâche mais aussi pour satisfaire des motivations propres. Il s'agit bien ici de coopération entre le robot et l'humain, l'interaction homme-robot devient une démarche «gagnant-gagnant»...

[Fong et al., 2003] ajoutent à cette liste trois classes :

⁸ «Moulding behavior and scaffolding environment»

- «*Socially situated*» Il s’agit des robots qui sont situés dans un environnement social qu’ils perçoivent et auquel ils réagissent. Ces robots doivent être en mesure de différencier les agents sociaux des autres objets de l’environnement.
- «*Socially embedded*» Ces robots sont (a) immergés dans un environnement social et y interagissent avec d’autres agents et avec des humains; (b) structurellement couplés avec leur environnement social; et (c) au moins partiellement au fait des structures interactionnelles humaines (ex : tour de rôle). Il y a donc ici une notion forte *embeddedness* sociale mais pas d’évolution ou de développement.
- «*Socially intelligent*» Ce sont les robots qui expriment «une intelligence sociale de type humain, basée sur des modèles approfondis de la cognition humaine et des compétences sociales⁹». En d’autres termes, il semble que ce soit les robots trop intelligents pour que les auteurs puissent en donner une définition autrement qu’en se référant à l’humain.

Cette définition et ces classes décrivent en partie le «*robot social*». Elles définissent en fait l’effet que le comportement doit avoir sur l’entourage social, sur l’homme, le fait que le comportement doit être compréhensible par l’homme, le fait que le comportement doit permettre une interface entre l’homme et le robot et que le robot doit pouvoir tirer des informations provenant de l’homme. Le robot doit être autonome, il doit exprimer une individualité, et, mais la description reste assez floue, le robot doit pouvoir être couplé à son environnement social («*socially embedded*»).

S’il est certain que la définition et les classifications de robots sociaux permettent dans une certaine mesure de se fixer des objectifs en terme de comportements, cette classification ne dit rien sur la manière dont ces comportements sont obtenus. Nous avons vu que les routines permettent d’obtenir des comportements robotiques complexes mais nécessairement limités dans leur variété lorsqu’il s’agit d’interaction avec le monde réel et à plus forte raison social (voir section 1.3.2). Dans l’ensemble de ce classement, il n’est nulle part question de l’*émergence* de l’interaction, et si un protocole d’interaction est nécessaire entre deux individus, il n’est nulle part question de la possible *émergence* d’un tel protocole.

Par définition, la *communication* est du changement, elle est génératrice de nouveauté, la nouveauté est même son essence : elle naît de la rencontre de deux agents et

⁹ «human style social intelligence, based on deep models of human cognition and social competence»

elle s'alimente de jamais vu entre eux.

Les classes qui correspondraient le mieux aux robots sociaux que nous souhaitons construire sont les deux dernières classes de Breazeal et la seconde de Fong : Robots qui s'engageant pro-activement dans l'interaction avec des humains de manières à satisfaire des motivations sociales internes. Les trois classes de robots sociaux proposées par [Fong et al., 2003] sont de complexité croissante : socialement situés, socialement *embedded* et socialement intelligents. La troisième de ces classes est trop ambitieuse pour notre thèse, c'est la seconde qui correspond le mieux à nos objectifs.

[Fong et al., 2003] font ressortir deux approches principales pour le développement d'agents sociaux intelligents : une approche biologique et une approche fonctionnelle. Contrairement aux recherches sur les interactions sociales à grand nombre d'agents identiques dont le comportement ne dépend pas de l'individu mais bien de la dynamique du groupe, chez l'humain comme d'ailleurs chez de nombreux mammifères (chien, chat, singes etc) la communication est construite autour des individus et est particulière pour chaque couple ou groupe d'individus qui communiquent entre eux. Contrairement à une communication individualisée et intuitive, lorsque la communication est basée sur des protocoles d'interaction, comme dans le cas des sociétés d'insectes ou dans le cas de robots contrôlés par des routines d'interaction, toutes les communications suivent un schéma unique quels que soient les individus mis en jeu, quels que soient les contenus des informations échangées et quels que soient les états des individus entrant en interaction.

Un robot n'est pas social uniquement par son apparence (décrite entre autre par l'«hypothèse de la vallée de l'étrange¹⁰» de Mori ou encore l'«espace de design¹¹» de McCloud [Blow et al., 2006]). Pour rendre les robots sociaux, il ne s'agit pas seulement de les rendre d'aspect acceptable en utilisant des humanoïdes ou des robots-compagnon «mignons», il ne s'agit pas seulement d'éduquer les humains à accepter les robots, à ne pas être effrayés par eux, mais c'est la nature (le fonctionnement propre) du robot qui

¹⁰ Uncanny valley hypothesis : la réponse émotionnelle de l'homme vis à vis d'un agent est d'autant plus grande que l'anthropomorphisme de l'agent est grand SAUF lorsque l'anthropomorphisme est presque maximal mais pas parfait. L'effet est alors pire que pour un anthropomorphisme très faible : un mort-vivant est émotionnellement négatif tandis qu'un smiley est positif

¹¹ Design space : espace triangulaire dans lequel peuvent être répartis des images de visage selon deux directions, le réalisme et la schématisation. Par exemple, un smiley y est situé comme réaliste et schématique.

doit évoluer, le robot doit être proactif, autonome, il doit enrichir l'homme avec lequel il interagit, au même titre que le bébé enrichit l'adulte qui interagit avec lui.

Le robot, dans la mesure où il est *embodied*, est sa propre interface avec le monde. Agir sur l'interface c'est agir directement sur la machine, et observer le robot ce doit être observer quelque chose de significatif pour l'interaction. C'est la nature de l'interface qui doit changer en même temps que la machine doit gagner en autonomie.

L'interface entre l'homme et le robot social combine l'acquisition et la restitution dans l'action. Ce sont les corps qui communiquent.

Les études sociologiques, philosophiques et psychologiques tentant de mesurer comment un humain perçoit un robot donné et notamment son caractère engageant, nous intéressent forcément. Il faut toutefois bien distinguer le caractère engageant d'un robot lié à sa beauté, à son physique, au fait qu'il soit humanoïde et à la curiosité qu'il suscite, du caractère engageant que peut avoir un robot parce qu'il entre en interaction avec nous. Pour notre étude, il faudra simplement s'assurer que, si l'aspect humanoïde d'un robot est un plus pour son attrait, le fait qu'il ne soit pas humanoïde n'interdit pas l'interaction. En fait les robots compagnons démontrent bien que pour que l'homme ait envie de communiquer avec un robot, il n'est pas nécessaire qu'il puisse physiquement s'y identifier. D'autre part comme nous le verrons en parlant du problème des correspondances, même au niveau neurologique, l'«action» suffit à produire un effet indépendamment du corps.

Beyon et al. (2005) favorisent la construction d'artefacts qui «embodient la connaissance» plutôt que des représentations abstraites basées sur des langages formels en utilisant ce qu'ils appellent l'«Empirical Modelling» [Beynon et al., 2005]. En fait, tout est écrit pas à pas en fonction des besoins; on ne s'intéresse pas aux propriétés du système comme émergeant de sa dynamique d'interaction avec l'environnement mais on écrit noir sur blanc les étapes de cette interaction. Le modelage empirique se réfère donc directement à l'*IA classique*.

Pour évaluer si ce type de caractérisation du robot social nous permettra de comprendre, modéliser et implémenter des *interactions intuitives* entre l'homme et le robot, nous devons laisser un peu de côté l'«éthologie des robots» pour nous préoccuper un peu de l'interaction chez l'homme.

1.5 Petite communication sur l'interaction.

Le terme interaction a une définition englobante dans le mesure où il s'applique à de nombreux phénomènes. Ainsi on peut le définir comme (<http://fr.answers.com/interaction>) :

- Réaction réciproque de deux phénomènes l'un sur l'autre.
- Action réciproque qu'exercent l'un sur l'autre deux ou plusieurs systèmes physiques. (Synonyme : couplage)
- Interactions fondamentales : actions réciproques entre les constituants fondamentaux de la matière.
- Interaction sociale : relation interpersonnelle entre deux individus au moins, par laquelle les comportements de ces individus s'influencent mutuellement et se modifient chacun en conséquence.

Une interaction est un échange d'information ou d'énergie entre deux agents au sein d'un système. C'est une action réciproque qui suppose l'entrée en contact de sujets [Wikipedia, 2007].

1.5.1 Premier télégramme sur l'interaction

En 1948, Shannon définit le problème fondamental de la communication comme étant celui de reproduire en un point exactement ou approximativement un message sélectionné en un autre point [Shannon, 1948]. Il construit donc un modèle du système de communication comme constitué de cinq parties : la source d'information, le transmetteur, le canal, le récepteur et le destinataire. L'information à transmettre est un contenu fixe et la communication est avant tout une transmission. Dans l'ensemble des communautés des mathématiques, de la théorie de l'information, des sciences sociales et de la psychologie, subsistera de cette définition, le modèle de communication dit du «*télégraphiste*» [Schefflen, 1982], qui décrit la communication comme un phénomène séquentiel procédant de la succession de trois phases, émission, réception et réponse. Ce modèle prévaudra jusque dans les années 70.

1.5.2 L'individu social sous l'œil du microscope.

De l'éthologie de l'individu à celle de la dyade en interaction

L'éthologie de la communication humaine, qui s'intéresse à la communication verbale (acoustique) et non-verbale (*préverbale* ou «*co-verbale*»), en observant le locuteur d'une part et l'auditeur d'autre part, lors d'interactions, s'est attachée à décrire avec précision et en tentant d'être exhaustif les différents comportements rencontrés chez l'humain lorsqu'il est dans un contexte social. Ainsi des comportements ont pu être énumérés, des enchaînements de comportements décrits avec précision, chez les enfants *préverbaux* qui interagissent ensemble [Blurton-Jones, 1972] ou chez les adultes *verbaux* qui discutent [Condon, 1976]. On pourra se référer aux pages 61 à 70 de «*Imitation et communication entre jeunes enfants*» de Nadel pour une revue critique des méthodologies d'étude de l'interaction sociale et du biais que des méthodologies mal contrôlées induisent dans les conclusions [Nadel, 1986] : Dans la définition du cadre expérimental, la taille du groupe d'enfants, le nombre d'adultes familiers ou non, participants aux interactions ou non, le camouflage ou non des caméras, sont autant de variables qui influencent tout résultat que l'on pourrait obtenir sur la *communication*. Dans la manière de relever les résultats, le recueil à partir de vidéo ou non, les choix de ce qui est filmé (par exemple chaque enfant l'un après l'autre) sont autant de choix qui conditionnent les facteurs observés.

S'il est certain que cette démarche appréhende la communication du point de vue de l'individu et non du point de vue de la *dyade*¹² impliquée dans l'interaction, elle a malgré tout permis au cours des années 70, de mettre le doigt sur le fait que les comportements moteurs des individus évoluent dans le temps tout en présentant des similitudes systématiques notamment en termes de rythmes de production [Condon, 1976] : il est d'une part question d'*auto-synchronie* lorsque les différentes modalités (motrices, vocales) d'un unique individu sont en phase ; il est d'autre part question d'*inter-synchronie*, ou *synchronie interactionnelle*, lorsque ce sont les deux partenaires d'une interaction dont les comportements sont synchronisés.

Coups d'œil *phatiques*¹³ et hochement de tête régulateurs. Une part de la régulation de l'interaction est attribuable au système phatique et certains troubles de l'interaction

¹² Dyade : couple (doublet) de personnes.

¹³ Fonction phatique : Fonction du langage dont l'objet est d'établir ou de prolonger la communication entre le locuteur et le destinataire sans servir à communiquer un message. «*Allô !*»

sont la conséquence d'un dysfonctionnement de ce système phatique.

L'apparition de ces variables de l'interaction, variables *dyadiques*, partagées par les interlocuteurs, a incité l'éthologie à étudier la communication sans négliger les relations réciproques existant entre les partenaires. Bien que les comportements aient été montrés comme étroitement imbriqués, ne pouvant être décrits indépendamment les uns des autres mais nécessitant une approche globale, jusque dans les années 85-90, le *modèle du télégraphiste* n'a pas été totalement mis en défaut. Ce sont toujours les comportements qui sont décrits, avec minutie, en notant leurs relations réciproques mais en attribuant ces relations communes (le tempo par exemple) au traitement de l'information transmise, d'une part lors de son émission et d'autre part lors de sa réception [Scherer, 1980]. Par exemple, la *synchronie* n'est encore pas considérée comme une variable intrinsèque de l'interaction mais plutôt comme un effet de bord.

Comme la majeure partie des classes de robots sociaux définis par Breazeal et al. (2003) et Fong et al. (2003), l'éthologie du développement humain s'est intéressée à décrire l'humain dans un contexte social mais du point de vue de l'individu. Pour construire un individu capable de communiquer il est nécessaire de prendre en compte ses interlocuteurs et leur évolution au cours du temps.

1.5.3 Et si on arrêta le temps pour mieux étudier l'interaction ?

Au delà des détails du comportement, les caractéristiques dynamiques de la dyade en interaction

C'est à l'époque de l'apparition de la notion d'*énaction* et d'une nouvelle approche de la cognition que la définition de la communication se verra transformée de manière profonde. Les trois phases décrites par le *modèle du télégraphiste* ne sont plus dissociées : lorsqu'un individu émet, l'autre reçoit simultanément, est actif dans cette réception et notamment envoie des signaux moteurs au premier : l'interaction est auto-régulée par les signaux qu'elle met en jeu (voir figure 1.5).

La communication est vue comme un tout constitué de l'ensemble des interlocuteurs ainsi que de leurs productions. Chacun des interlocuteurs est à la fois acteur de ce tout et sous l'influence de ce tout. L'information échangée est une entité instable, modifiée par la transmission même, ainsi que par le récepteur. Alors, par définition, la communication

n'est abordable, que ce soit théoriquement ou expérimentalement, qu'en présence de tous ses acteurs : chacun des agents, l'information échangée dans un sens, l'information échangée dans l'autre sens et surtout le changement, c'est à dire leur co-évolution à tous au cours du temps.

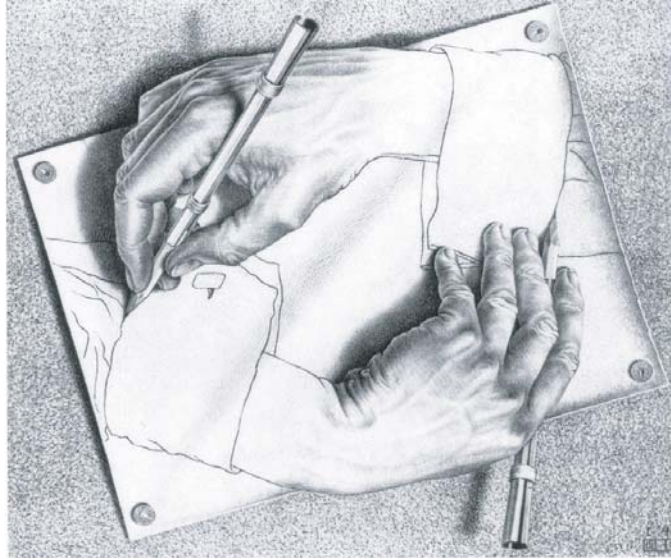


Fig. 1.5: «*Mains dessinant*», Maurits Cornelis ESCHER. «*L'acte de communiquer ne se traduit pas par un transfert d'information depuis l'expéditeur vers le destinataire, mais plutôt par le modelage mutuel d'un monde commun au moyen d'une action conjuguée*» [Varela, 1989].

Appréhender la communication en prenant en compte cette co-évolution de ses acteurs a conduit à définir de nouvelles variables pour son étude, pour sa description et pour sa compréhension. Nadel et al. ont défini «les aspects de synchronie et de diachronie¹⁴» comme «des fondamentaux étroitement intriqués de ce tout (qu'est la communication)» [Nadel and Camaioni, 1993]. La *synchronie* définit un état clef de la dyade qui communique. C'est l'état dans lequel les deux agents sont fortement couplés, l'«*embeddedness*» des agents l'un vis à vis de l'autre est maximale et les mondes de chacun convergent en un seul. Cet état est celui dans lequel sont deux agents qui s'imitent, lorsque le monde de chacun est l'action au cœur de l'imitation. Cet état fusionnel où le monde est modelé à deux, est défini comme de la communication si il est en évolution (sans nécessairement la

¹⁴ Du grec *dia*, «à travers» et *chronos*, «le temps». Diachronie : Qui concerne l'appréhension d'un fait ou d'un ensemble de faits dans son évolution à travers le temps.

notion de progrès mais avec la notion de changement) et si il engendre de la nouveauté : communiquer, c'est «interagir dynamiquement de telle sorte que cette interaction change l'état cognitif de chacun des partenaires» [Nadel, 2002a]. Il est donc nécessaire d'appréhender la communication dans sa *diachronie*, de considérer les actions et les influences réciproques des agents qui communiquent comme des phénomènes changeant, qui évoluent au cours du temps.

1.5.4 Étudier non pas l'homme en interaction, mais l'interaction elle-même

Nouveaux paradigmes : «Still-face» et «Double-vidéo»

Le système complexe que constituent des entités en interaction ne peut être étudiée du point de vue des entités sans prendre en compte les propriétés *émergentes* justement liées à l'interaction de ces entités. La communication est un phénomène réciproque, qui doit nécessairement être abordé du point de vue dyadique et non du seul point de vue de l'individu. Comment alors, au lieu de se focaliser sur l'individu social, peut-on étudier les paramètres de la communication elle-même, à savoir la *synchronie*, l'*harmonisation*, l'*attention conjointe*, l'*imitation* et la *co-régulation* entre les différents systèmes en interaction ?

La psychologie s'enrichit du point de vue de la dynamique des systèmes [Nadel and Tremblay-Leveau, 1999, Mertan et al., 1993], avec le *modèle de l'orchestre* [Schefflen, 1982] qui réforme les études de la communication précoce : on étudie plus le bébé mais le produit du système qu'il forme avec sa mère et on expérimente en manipulant les variables dyadiques telles que la synchronie.

Un nouveau paradigme expérimental a vu le jour en 1978 avec le «*still-face*¹⁵» de Tronick et al. [Tronick et al., 1978] ([Adamson and Frick, 2003] pour une revue) : ce sont les variables caractéristiques de la communication elle-même qui sont manipulées et ce sont les effets de cette manipulation sur les acteurs de l'interaction qui sont mesurés.

L'expérience de *still-face* consiste en 3 épisodes de 60s, un épisode d'interaction spontanée («comme à la maison») entre mère et bébé, un épisode où la mère doit se figer complètement avec une expression émotionnelle neutre (le *still-face*), et un troisième épisode où l'interaction reprend normalement. Chez les bébés dès 6 semaines l'effet

¹⁵ visage immobile

du *still-face* est systématique, ils essaient de regagner l'attention de leur mère puis se mettent à pleurer : le *still-face* rompt complètement l'interaction. Dans cette première génération de protocoles jouant sur les paramètres de l'interaction, c'est l'adulte qui manipule lui-même son comportement.

Une deuxième génération de protocoles a vu le jour en 85 [Murray and Trevarthen, 1985], qui utilisent la vidéo pour contrôler l'interaction. Cette fois sur 2 périodes, la première est filmée, puis le film est rembobiné et repassé au bébé quelques minutes après. La manipulation de l'interaction est ici plus subtile que dans la première génération de protocoles, l'adulte ne devient pas complètement impassible mais l'on présente à l'enfant le film d'un adulte socialement actif, qui sourit, parle et le regarde. L'effet est significatif, les enfants regardent moins le film, sourient moins, font plus de grimaces, que lorsque leur mère interagit avec eux [Murray and Trevarthen, 1985, Hains and Muir, 1996, Rochat et al., 1998]. Ici la raison de l'absence de communication ne peut-être attribué à l'effet de l'expression émotionnelle neutre de la mère ni au fait qu'elle soit immobile. Ce protocole s'est cependant vu reprocher le fait que l'interaction n'était pas directement manipulée dans la mesure où il y a un délai entre les situations de *direct* et de *différé*. Ce sont deux situations indépendantes qui sont proposées à l'enfant.

Une troisième génération de protocoles a suivi à partir de 1999 [Nadel and Tremblay-Leveau, 1999], dans laquelle l'image de l'adulte est continue mais manipulée techniquement. Composé de trois périodes, ce protocole propose 30sec d'interaction télévisée entre la mère et l'enfant (avec contact visuel grâce à un dispositif de téléprompteur), puis sans interruption l'enregistrement de ces 30sec est rediffusé à l'enfant, et enfin l'interaction télévisée en direct reprend pendant 30s. L'effet est significatif, les bébés (2 mois) détournent le regard, ne sourient plus et présentent des réactions faciales négatives, à la différence de leur comportement lorsque leur mère interagit avec eux en direct [Nadel et al., 1999a, Nadel et al., 2005, Striano et al., 2005, Soussignan et al., 2006]. L'effet est d'autant plus flagrant que lors de la troisième phase (retour au direct) les variables reviennent à leur valeur initiale, avant perturbation. Face aux mêmes sourires, mêmes paroles, même attention de la mère, le bébé arrête de répondre si il n'y a plus d'interactivité, si ce qu'il perçoit n'est plus *synchrone* avec ses propres actions.

Ainsi les psychologues du développement ont montré l'existence de manière très pré-

coce de capacités à détecter des variables caractéristiques de l'interaction. Cette précocité dans le développement pose la *synchronisation* non pas comme émanant de processus cognitifs élaborés mais plutôt comme étroitement liée aux dynamiques des fonctionnements neurobiologique et sensori-moteur. Le fait que le bébé soit «équipé» pour détecter la *synchronisation* le rend capable de mesurer, depuis son point de vue d'individu, la qualité de l'interaction, phénomène plus global que lui. La *synchronie* est le lien entre les entités en interaction et le phénomène *émergent* de cette interaction. Nous garderons ceci à l'esprit dans nos expérimentations en développement humain et robotique.

1.6 Imitation : enfance de l'art de communiquer

L'imitation est un moyen de communication.

1.6.1 Entendons nous :

de nombreuses définitions pour un seul mot

Depuis qu'il est question d'étudier l'*imitation* [Baldwin, 1897], celle-ci s'est vue définie par des caractéristiques variées, allant de l'imitation différée à l'imitation synchrone, de l'apprentissage par observation à la communication, de l'imitation du geste à l'imitation du but de l'action. En fait nous verrons que ces caractéristiques de l'*imitation* peuvent être décomposées en trois axes, l'un décrivant la *structure temporelle* de l'*imitation*, l'autre décrivant sa *fonctionnalité*, et le troisième décrivant son *objet* (voir figure 1.6). Chaque définition de l'*imitation* se positionne alors sur chacun de ces trois axes.

Imiter c'est en premier lieu «apprendre en voyant faire»

Ainsi, une des premières définitions de l'*imitation* est celle de Thorndike : Apprendre à faire un acte en le voyant faire [Thorndike, 1898]. Il s'agit ici d'*apprentissage par observation* (*observational learning*) ne nécessitant ni motivation ni renforcement, sans essais et erreurs [Bandura, 1971] : la *fonctionnalité* de l'*imitation* est clairement l'*apprentissage*, sa *structure temporelle* est le *différé* (la présentation est suivie d'un délai avant la reproduction et le modèle n'est en général plus présent) et son *objet* est le *but de l'action* plutôt que l'action elle-même [Guillaume, 1925, Wallon, 1942].

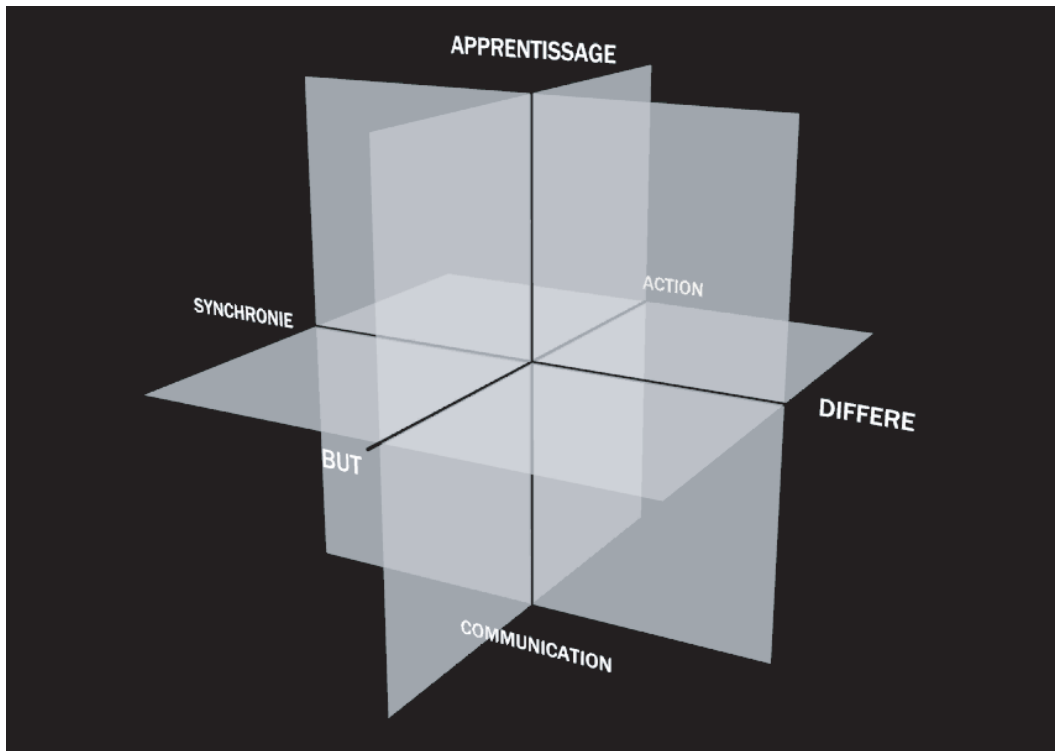


Fig. 1.6: *L'imitation* : espace varié pour définitions multiples. Trois axes, la *structure temporelle* (de l'imitation différée à l'imitation synchrone), la *fonctionnalité* (de l'apprentissage à la communication), l'*objet* (de l'action au but de l'action).

Ce type de définition persiste jusqu'à nos jours, l'*imitation* étant toujours en grande majorité perçue comme avant tout un moyen d'apprendre : l'imitation «vraie» suppose de reproduire une action nouvelle, avec la même stratégie et dans le même but [Tomasello et al., 1993], «l'imitation met en jeu l'aptitude à apprendre des autres dans un contexte social et à incorporer des comportements observés chez les autres dans le répertoire moteur [...] C'est le moyen par lequel nous absorbons répétons et de ce fait devenons imprégnés de la culture humaine» (traduit de la préface de [Rogers and Williams, 2006]).

Imitation, fonction symbolique de la cognition

En 1945, Piaget décrit le développement de l'enfant, et donc entre autres celui de l'*imitation*, du point de vue de l'acquisition du langage, de l'acquisition de capacités à raisonner, juger, inférer et se représenter le monde [Piaget, 1945]. Il définit alors différents «*stades* de développement» en fonction d'une présupposée hiérarchie des comportements dont l'enfant est capable. Si il est certain que l'approche de Piaget, l'observation du changement comme moyen de «découvrir une embryologie de l'intelligence», a révolutionné les méthodes expérimentales de la *psychologie du développement*, elle n'en n'est pas moins limitée par son objet qui est l'étude de l'acquisition de capacités à abstraire et à raisonner logiquement. Piaget considère l'intelligence comme essentiellement liée à la capacité d'abstraire et de se représenter le monde sous forme de symboles et c'est dans cette perspective qu'il définit l'*imitation* : Nadel précise que Piaget considère que l'*imitation* «serait la première manifestation [...] de la fonction symbolique, [...] (c'est le) «processus assurant la transition entre l'intelligence sensori-motrice et la représentation imagée» [Piaget, 1962]p.143 » [Nadel, 1986].

L'*imitation* définie par «apprendre en voyant faire» et considérée par Piaget comme la transition vers une cognition de «haut niveau» est, encore de nos jours, le «graal» de nombreux roboticiens ayant, d'une part, foi en Piaget et étant, d'autre part, attirés par l'idée d'une cognition symbolique [Schaal, 1997, Billard and Schaal, 2001, Demiris, 2002, Schaal et al., 2003, Schaal et al., 2004, Dearden and Demiris, 2005, Dearden and Demiris, 2007]. Ces travaux font passer la cognition par la construction de modèles internes : modèles des objets de l'environnement, modèles des agents sociaux de l'environnement. Ainsi même s'il est question d'apprentissage et de développement, il n'est pas question d'émergence

de dynamiques comme c'est le cas lors d'interactions sociales, et ce ne sont que des modèles figés du monde qui sont acquis.

L'apparition de cette *imitation* est située autour de 15 mois par Piaget. Cette datation a longtemps fait figure de vérité, malgré des résultats expérimentaux la contredisant.

Protrusion de langue aux symboles



Fig. 1.7: Imitation de protrusion de la langue par un nouveau-né macaque rhésus un jour après la naissance [Ferrari et al., 2006].

Ainsi, dès 1945 Zazzo observe la protrusion de la langue de son fils en réponse à la protrusion de sa propre langue et publie plusieurs années plus tard une étude portant sur 17 enfants de 15 jours [Zazzo, 1957]. Ce n'est qu'en 1977 que Meltzoff et Moore reprennent ces travaux et observent une augmentation de la fréquence de protrusion de la langue, de clignements des yeux, d'ouvertures de la main, de gonflements des joues, chez le nouveau-né d'une douzaine de jours si il se voit présenté respectivement des protrusions de langue, des clignements d'yeux, des ouvertures de main, des gonflements de joues [Meltzoff and Moore, 1977]. Meltzoff et Moore remettent alors clairement en question le point de vue de Piaget en évoquant une *imitation néonatale*, exempte de capacité d'abstraction.

S'ensuivent 10 années de débats et d'expérimentations contradictoires visant à caractériser l'*imitation* et son développement, à savoir si *imiter* requiert des capacités de représentation symbolique. En 86, Nadel, relatant en substance et soumettant à une analyse heuristique les recherches depuis Piaget, montre que la question de ce qui est observé par l'expérience («faits ou artefacts»), les conclusions théoriques sur les mécanismes sous-jacents de l'*imitation*, et le choix d'une définition de l'*imitation*, dépendent

complètement les uns des autres [Nadel, 1986, Aouka, 2006].

Comment évaluons-nous l'*imitation* ?

Savoir comment évaluer une *imitation* n'est pas qu'un enjeu pratique pour l'expérimentation, c'est avant tout un enjeu théorique qui implique de caractériser les différentes facettes de l'*imitation*. En effet, les performances imitatives de sujets d'expériences sont soumises aux facteurs suivants : intérêt pour l'*objet* de l'*imitation*, précision attendue lors de la reproduction, *objet* de l'*imitation* (but ou action). Aouka dans sa thèse analyse les différentes compétences en jeu selon le type d'imitation étudié lorsque le geste est non significatif : position de la main, configuration des doigts, postures combinées [Aouka, 2006, Nadel and Aouka, 2006].

Par exemple, différents résultats suivent les observations de Piaget et tendent à les valider (Paraskevopoulos et Hunt montrent en 71 l'existence d'une corrélation entre le niveau de construction de l'objet (lié lui même aux capacités de représentation) et le niveau imitatif [Paraskevopoulos and Hunt, 1971]) mais ces résultats mesurent l'évolution de l'*imitation* dans des conditions différentes (sans objet lorsque la manipulation d'objet n'est pas acquise, avec objet ensuite) et donc, se pose la question de ce qui est mesuré. L'effet observé est-il lié à la capacité à *imiter* ou à la plus grande *affordance*¹⁶ d'une condition par rapport à l'autre ?

De même les actions avec objet sont plus imitées que les gestes non visibles par l'imitateur (ex : expressions faciales) et ceci à tout âge. Peut-on pour autant en conclure que les capacités d'*imitation* sont plus abouties lorsque l'enfant sait manipuler des objets ? Il y a ici un effet lié à la modification de plus d'un facteur (âge et *objet* de l'*imitation*), la conclusion sur le développement de l'*imitation* est alors hâtive. En fait ce qui ressort plutôt de ces observations et qui est plus général, est que «la fréquence et la qualité des imitations dépendent largement des caractéristiques de l'activité modèle» [Nadel, 1986].

Toujours concernant cette relation étroite entre modèle théorique de l'*imitation* et méthode expérimentale, Nadel souligne la relation de la définition de l'*imitation* à l'ob-

¹⁶ *affordance* : étant donné un individu incarné, l'affordance d'un objet (objet inanimé, agent ou situation spécifique) pour cet agent est l'ensemble des actions et des comportements que cet objet peut susciter chez cet agent. Pour un robot sur roues, l'affordance d'un tronc d'arbre ou d'un tabouret est la même, il peut s'y cogner ou tourner autour, elle est par contre différente de l'affordance d'une rivière, qu'il peut longer ou dans laquelle il peut tomber.

servabilité de cet imitation : «La reproduction différée d'un procédé original dont la ressemblance avec le modèle est frappante, constitue la condition de l'indexation d'un comportement comme imitation différée spontanée. Le critère de précision est donc une condition du recueil de l'observation et non un critère des imitations.».

Notons que nous avons choisi de réduire à un axe unique l'*objet* de l'*imitation*, puisque c'est une des trois caractéristiques majeures des définitions de l'*imitation*, mais qu'en fait cet *objet* de l'*imitation* pourrait lui-même être décomposé selon plusieurs dimensions :

- le tempo
- la précision du geste
- l'effet de l'action imitée sur l'environnement

Il s'agit bien ici de définir l'*imitation* en fonction de «ce qui est imité» et que nous avons qualifié d'*objet* de l'imitation : Nadel pose le problème «La référence est-elle nécessairement la performance du modèle, ou est-ce la cible de l'imitation de l'enfant?». Cet aspect de la définition de l'*imitation* ne doit surtout pas être négligé dans la mesure où si l'on définit l'*imitation* comme la capacité à reproduire fidèlement la performance du démonstrateur, alors un bébé qui ne referait qu'une partie du comportement du démonstrateur ne serait pas qualifié d'imitant, tandis que si l'*imitation* est définie comme la reproduction même partielle d'un comportement, alors ce même bébé sera vu comme imitant. Cet aspect *objet* de la définition de l'*imitation* doit être précisé avec soin tant il change les observations en *développement humain* et les objectifs en *développement robotique*.

Ne refermons pas le débat

Ces résultats ont poussé les auteurs à nuancer leurs définitions de l'*imitation* notamment en proposant des *imitations* plus frustes basées sur des couplages sensori-moteurs avec l'environnement ou avec d'autres agents. Par exemple, plutôt que d'*imitation* Spence ou Thorpe préfèrent parler de *saillance d'un comportement* : lorsqu'un individu d'une espèce est plongé dans un environnement certaines actions sont plus saillantes que d'autres, parce que par exemple plus adaptées à l'*embodiment* de l'individu, plus *affordantes* et donc pour l'ensemble des individus issus d'une même espèce certaines actions sont plus probables que pour des individus issus d'autres espèces [Spence, 1937, Thorpe, 1963]. Si un congénère est vu en train de faire une action alors la saillance de cette action peut en être changée (renforcée) pour l'observateur (*Stimulus*

enhancement) [Byrne and Russon, 1998]. Ces auteurs séparent ces définitions de celle de l'*imitation* bien qu'il y ait une transmission de comportement d'un individu à l'autre.

Whiten et Ham en 92 tâchent de préciser ce que signifie *imiter* : «B imite A si B apprend de A un aspect de la forme d'un comportement». Ici la précision de la reproduction n'est pas nécessaire mais par contre l'apprentissage est au centre de la définition et c'est le but de l'action qui est l'*objet* de l'*imitation* [Whiten and Ham, 1992]. Pour coller à cette définition et à la précédente on peut alors parler de «changer la saillance d'un but» ou d'*émulation* [Köhler, 1925, Tomasello, 1990]. En fait, certaines définitions se placent plus du point de vue d'une *imitation* en tant que comportement émergent plutôt qu'en tant que fonction issue du traitement symbolique du monde.

Ainsi, comme pour ce qui est de la navigation [Cuperlier et al., 2006] et de la reconnaissance d'objet [Maillard et al., 2006], l'équipe de Gaussier appréhende ce problème de l'*apprentissage par imitation* en évitant d'utiliser des modèles de l'environnement ou des agents sociaux et en tâchant de se placer dans une perspective où c'est la dynamique des systèmes mis en jeu qui fait émerger le comportement [Zrehen and Gaussier, 1994]. Pour faire émerger un comportement d'*imitation* chez un robot, ils utilisent deux principes, l'*homéostasie* du système (que nous avons évoqué section 1.3.3) et ce qu'ils appellent l'«ambiguïté de la perception».

L'*homéostasie* du système réside dans le fait que s'il a appris des associations entre perception visuelle et état moteur (état proprioceptif d'un bras ou vitesse de déplacement) le système tend à minimiser les différences que des changements dans l'environnement peuvent occasionner sur ces associations : si le robot apprend que lorsque sa main est dans une zone Z de son champ visuel sa proprioception est $P(Z)$, alors si sa main est perçue dans la zone Z mais que sa proprioception n'est pas $P(Z)$, il corrige la position de son bras jusqu'à ce que sa proprioception soit égale à $P(Z)$ [Gaussier et al., 1998].

L'*ambiguïté de la perception* est le fait que sous certaines conditions le système peut confondre des éléments de l'environnement qui sont distingués par l'observateur (humain). Par exemple un robot Khepera programmé pour éviter les murs et ramasser des bouchons différencie les uns des autres en fonction du nombre de ses capteurs de proximité contigus activés simultanément (1 capteur activé par un bouchon, deux ou plus par un mur). L'ambiguïté de la perception apparaît dans le fait que le robot perçoit les tas de plus de deux bouchons comme des murs et non comme des bouchons. Il s'ensuit l'émergence de dynamiques particulières qui font que le robot rassemble et

aligne les bouchons en tas (alors qu'il n'est explicitement conçu que pour faire des tas de deux bouchons) et qu'une population de robots divise l'espace en régions, chacune de ces régions étant «rangées» par un sous-groupe de robots «spécialistes» de cette région [Gaussier and Zrehen, 1995a]. Pour l'*imitation*, l'ambiguïté de la perception utilisée est celle pouvant exister entre la perception visuelle de son propre corps et celle du corps d'un autre agent. Ainsi, lorsque le robot perçoit l'extrémité d'un bras (c'est en fait la zone de plus fort mouvement dans son champ visuel), il ne distingue pas si ce bras lui appartient ou non. Ceci induit que si le robot a appris à associer la perception visuelle de son bras à sa proprioception et que «à son insu» on lui tourne la tête de manière à ce qu'il perçoive le bras d'un démonstrateur, alors le robot confond ce bras avec le sien et détecte donc un désaccord entre sa proprioception et la position supposée de son bras dans son champ visuel. Le principe homéostatique fait qu'il corrige sa proprioception de manière à ce qu'elle corresponde à sa perception visuelle. Le robot, sans modèle de l'autre, sans modèle de ce qu'est l'*imitation*, a un comportement d'*imitation* [Gaussier et al., 1998, Andry et al., 2002a, Andry et al., 2002b, Andry et al., 2002c].

Nous pourrions noter ici aussi le travail de Blanchard et Cañamero (2006) qui, très proche de ces idées d'*ambiguïté de la perception* et d'*homéostasie* qui couplées font émerger l'*imitation*, propose que l'*imitation* soit contrôlée par une variable de type «*émotion*». Un contexte émotionnel positif (par exemple la présence d'un parent) aurait l'effet inverse de l'*homéostasie* et pousserait le robot à maximiser l'erreur liée à ses prédictions : en situation rassurante, le robot explore au maximum ses possibilités. Émerge alors un comportement qui, lui aussi, peut-être qualifié d'*imitation* : si un agent («ami») s'approche du robot immobile, le flot optique dans le champ visuel du robot est plus grand que celui qu'il prédit (qui devrait être nul), et donc si il maximise cette erreur, il imite le mouvement de l'autre agent en miroir (il se rapproche quand l'autre se rapproche et s'en éloigne quand l'autre s'éloigne) [Blanchard and Cañamero, 2006, Blanchard and Cañamero, 2007]. Notons toutefois que ce type de solution (maximisation de l'erreur dans un contexte familial) n'est pas directement applicable à l'*imitation* des mouvements d'un bras.

En fait, quelles que soient les approches ci-dessus il ne s'agit pas de communication mais d'apprentissage. Gaussier et son équipe ont été essentiellement en quête de cette fonction d'apprentissage jusqu'au début des années 2000. Ils se sont heurtés à ses limites : l'*imitation* émerge certes des propriétés dynamiques du robot mais pas du cou-

plage avec l'environnement (ici social). Le système robotique n'est que faiblement couplé au démonstrateur de l'action à imiter et celui-ci est le seul à pouvoir maintenir le peu de couplage existant. Le démonstrateur doit être un humain, seul capable de modifier sa dynamique (vitesse, tempo) suffisamment efficacement pour ne pas perdre le robot [Moga and Gaussier, 1999]. Un des principaux problèmes rencontrés avec ce modèle est le fait que le robot qui imite ne suit pas la trajectoire exacte du robot démonstrateur (un carré). Pour corriger le problème, les dynamiques de suivi de la tête de robot et du corps sont séparées, ce qui introduit de l'inertie dans les déplacements du robot et fait que sa trajectoire correspond mieux à la trajectoire ad-hoc de l'humain. En fait la raison pour laquelle l'*imitation* ne pouvait pas être correcte sans cette modification est tout simplement que le comportement proposé par le démonstrateur n'est pas «écologique» du point de vue du robot : ce que propose le démonstrateur n'est une conséquence ni de contraintes de l'environnement (qui pourraient le cas échéant avoir les mêmes effets contraignants sur le robot) ni de contraintes liées à l'interaction sociale (qui induirait une adaptation réciproque des comportements des partenaires, limitant ainsi les disparités liées à leurs différences d'*embodiment*). La solution apportée par Gaussier et son équipe est apportée en modifiant la dynamique du robot, changeant ainsi les contraintes environnementales sur le robot.

En fait derrière le débat sur «ce qu'est l'*imitation* », se cachent les différentes approches de la cognition que nous avons énoncées dans les parties «*IA classique*» 1.3.2 et *Alter-cognitivism* 1.3.3. En effet, le choix d'une séparation forte entre «*mimétisme*» et *imitation vraie* est aussi un choix pour les mécanismes sous-jacents qui sont considérés comme distincts. Le choix d'une continuité depuis l'*imitation néonatale* jusqu'à l'*imitation vraie* est un choix de mécanismes sous-jacents se recouvrant au moins partiellement. La découverte des «*neurones-miroirs*», qui s'activent aussi bien en situation d'*action* qu'en situation d'*observation*, dans le cortex prémoteur du macaque et de l'homme, suggère que l'hypothèse d'une continuité entre phénomènes imitatifs hiérarchisés est raisonnable [Rizzolatti and Craighero, 2004].

Même si de nombreux roboticiens s'intéressant aux robots sociaux ont compris que l'imitation est un bon moyen d'interagir avec le monde social, ils restent toujours sur la vieille idée que la fonction de l'imitation est l'apprentissage et que finalement interagir socialement c'est s'apprendre des choses l'un à l'autre (Breazeal et al., Learning from and about others : towards using imitation to bootstrap the social understanding of others

by robots, Billard Robota : Clever toy etc). Si l'on observe leur démarche, conscients de la «difficulté» de définir a priori les représentations qui permettraient à un robot d'interagir avec un monde social, c'est à dire d'inscrire a priori des conventions sur les interactions sociales dans le robot, ils partent du principe que ces représentations pourront être apprises au contact dudit monde social. Un des outils sensé permettre cet apprentissage est l'imitation. Nous revenons tête baissée à notre première intuition, celle qui est d'acquérir les bonnes représentations du monde. Même si les conventions à apprendre ne sont pas connues a priori, le système qui est ciblé par cet apprentissage, est un système de l'IA *classique*, c'est à dire qui a des représentations du monde (social) et des règles permettant de mettre à profit ces représentations. Il est certain que l'agent social a une histoire des relations individualisée, il n'interagit pas de la même manière avec les autres suivant l'historique qu'il partage avec. Cependant, si l'on considère une dyade d'agent ayant un historique commun, les conventions d'une nouvelle interaction entre eux ne peuvent être définies à l'avance, elles se construiront une fois de plus au cours de l'interaction, en fonction de cet historique commun. Ainsi, si il est certain qu'une part d'historique des relations influence la manière présente d'interagir, une part bien plus importante de cette influence revient à l'effet du couplage des deux agents sur le moment. Mais au même titre que la communication est un phénomène de changement, sa nature est justement dans l'acte de créer, défaire et recréer des conventions entre les partenaires qui communiquent.

Imiter pour communiquer

«L'imitation met en jeu des situations d'interaction entre personnes, où l'acte d'une personne sert de modèle à une autre. Cependant cet aspect «interpersonnel» de l'imitation n'a fait l'objet que de peu d'attention tandis que l'accent était mis sur l'aspect cognitif de l'imitation. Deux vues distinctes de l'imitation semblent possibles, l'une centrée sur la tâche cognitive de compréhension de l'acte observé, et l'autre centrée sur les interactions entre individus», traduit de [Uzgiris, 1981].

En 86 Nadel définit la capacité à interagir socialement : ce n'est pas réagir à des objets sociaux ou faire réagir des objets sociaux, mais chaque partenaire modifie la situation de l'autre et en subit les effets en retour.

Nadel montre en 86 que non seulement l'une des deux fonctionnalités essentielles de l'imitation est la *communication* mais en plus l'imitation est une modalité permettant la

mise en place d'interactions. Ainsi elle montre qu'entre 18 et 24 mois (avant la maîtrise du langage) si deux enfants sont placés dans un environnement favorisant l'imitation, comme par exemple un environnement dans lequel les objets sont en double exemplaires, alors les enfants passent plus des deux tiers de leur temps en imitations réciproques synchrones, tandis que dans un environnement qui ne favorise pas l'imitation, dans notre exemple si les objets sont en exemplaire unique, alors les jeux d'imitation réciproque ne sont pas remplacés par d'autre forme de communication verbale ou non et les moments de communication entre jeunes enfants sont limités à moins de cinquante pour cent du temps.

Notons au passage que l'environnement avec les objets en double exemplaire améliore l'*embeddedness* social des jeunes enfants.

Ainsi, l'*imitation* n'a plus uniquement une fonctionnalité d'apprentissage, mais elle devient aussi un comportement social. Dans la première partie de son livre (les 95 premières pages), Nadel montre au regard de la littérature de l'époque que l'imitation ne peut être définie de manière univoque, qu'elle est plurielle et que les différents aspects de cette pluralité ne sont pas tous présents dans chaque imitation. Le jeune enfant peut imiter pour apprendre mais aussi imiter pour interagir socialement, et dans ce cas il imite quelque chose qu'il maîtrise déjà.

Comme Nadel l'écrit dès 1986, «(Nous pouvons) considérer [...] que les comportements imitatifs sont plus que de simples comportements socialement orientés, plus que des moyens d'influence sur l'autre, en fait de véritables outils d'interaction» [Nadel, 1986]. Et elle nous fait remarquer dans ce même ouvrage : «La réciprocité de ces comportements les différencie de ceux décrits sur la base d'une relation hiérarchique cristallisée entre modèle et imitateur».

C'est à la lumière de ces remarques que Gaussier et son équipe accompagnés de Nadel intègrent dans leurs modèles de l'*imitation* ces deux fonctionnalités d'*apprentissage* et de *communication* qui ne se limitent pas à co-exister, mais interagissent et se voient enrichies l'une de l'autre [Andry et al., 2000a, Andry et al., 2000b]. La notion de rythme et de séquences temporelles apparaît avec l'idée que l'*imitation* est *dyadique* : que l'on soit *imité* ou *imitant*, la dynamique de l'autre doit être prise en compte, elle doit modifier notre propre dynamique pour que le couplage avec l'autre soit possible et robuste. Ainsi, vient se greffer à l'*homéostasie* et l'*ambiguïté de la perception* la capacité de prédire un rythme ou une séquence rythmique de position dans l'espace, ceci

aux seins de modèles connexionnistes compatibles avec les données de la neurobiologie [Andry et al., 2001, Andry et al., 2002a, Andry et al., 2004, Andry and Gaussier, 2006]. Le robot a donc acquis un des fondamentaux dans la communication (section 1.5.4) : le contrôle de son propre rythme et la capacité d'apprendre une séquence rythmique. La prochaine étape est donc de rendre le robot capable de s'adapter à son partenaire lors de l'interaction.

S'il est certain que Gaussier et son équipe sont parvenus à faire émerger de l'*imitation* au sein d'un système n'étant pas explicitement dédié à cela et avec les mêmes principes que ceux qui leur servent à faire de la planification, du «homing» ou de la *reconnaissance d'objet*, il n'est cependant pas encore question du «modelage mutuel d'un monde commun au moyen d'une action conjuguée». Il est nécessaire de modéliser des capacités à se synchroniser avec l'autre et à prendre des tours de rôle dans l'interaction, mais avant tout, il est nécessaire de modéliser des capacités à se coupler avec l'autre de manière robuste en un nouveau système plus riche, en «partageant l'effort d'interaction» : une seule architecture ne suffit pas actuellement pour que le robot puisse assumer et le rôle du démonstrateur et celui de l'imitant, une relation hiérarchique entre modèle et imitateur subsiste.

Développement

Lorsque l'on s'intéresse à l'évolution de l'imitation au cours du développement, se pose le problème de la mesure de cette évolution. En effet, on observe des changements en fréquence et en qualité, mais ces changements dépendent énormément des conditions expérimentales (cadre qui incite à l'imitation ou non : cadre familial ou non). Ces effets, notamment liés à l'influence du lien socio-émotionnel avec le modèle, pourraient être schématisés sur nos trois axes comme le fait qu'un cadre expérimental particulier «déplace» le type d'*imitation* que le sujet est susceptible de faire vers différentes régions de notre espace. Par exemple, un cadre familial facilite l'*imitation* dont le but est la *communication* et donc si le cadre se prête de plus à la *communication* par l'*imitation* (ex : objets en double exemplaires) l'*imitation* est facilitée.

En fait si l'on retient la caractéristique commune à ces formes d'imitations, «toute réalisation motrice ou verbale d'actes ou de sons spécifiques qui s'apparentent à ceux réalisés antérieurement par un modèle» [Yando et al., 1978], alors les autres caractéristiques de l'*imitation* telles que celles décrites dans le schéma 1.6 sont essentiellement

liées au développement de l'enfant.

- Imitation néonatale.
- À six mois possibilité d'imitation d'une protrusion de la langue mais incapacité à imiter une action nouvelle concernant une partie même visible du corps.
- Deuxième moitié de la première année : premières imitations d'action non connues (début de l'apprentissage par observation ?), premières imitations d'actions en fonction de leur but (mais attention, problème de la manipulation d'objets), premières imitations d'actions dirigées vers des objets (n'est ce pas en fait une seule et même évolution).
- Début de la deuxième année : imitation d'action plus complexes, de séquences d'actions.
- Apparition d'imitations différées.
- Apparition de jeux impliquant des représentations après 15 mois. Entre 21 et 24 mois, plus forte progression dans les jeux symboliques et les imitations différées (imitations différées rares avant 2 ans). (stade VI)

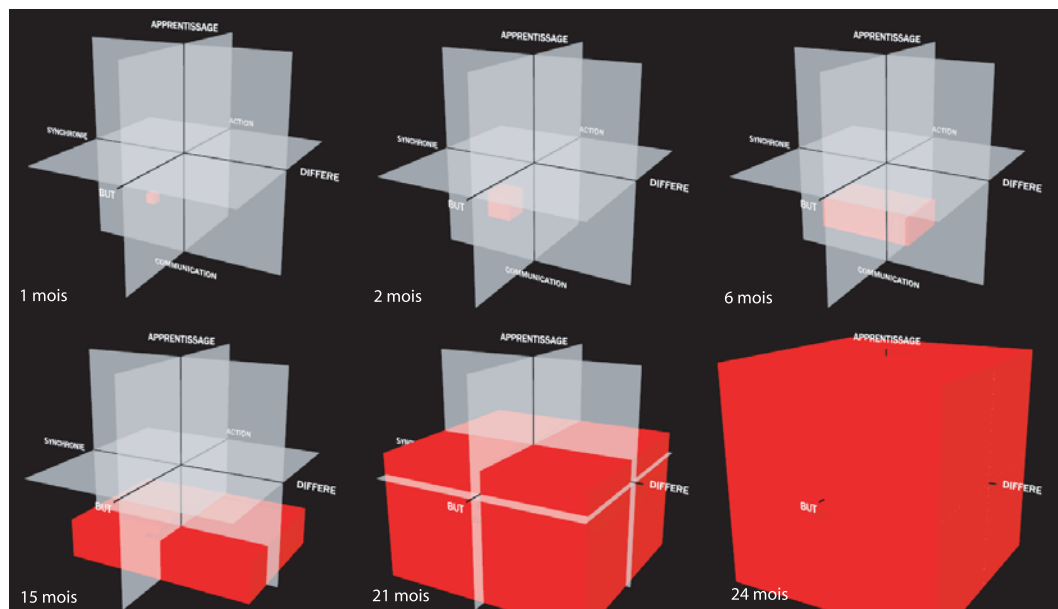


Fig. 1.8: Au cours du développement, les types d'*imitation* se diversifient et se complexifient sans toutefois mettre de côté les fonctionnalités antérieures.

L'*imitation* synchrone d'actions déjà connues qui a cours dès la naissance est transitoire, elle disparaît avec l'acquisition du langage, mais elle n'en est pas moins décisive, en effet c'est un élément fondamental de l'ancrage dans le monde social, de l'apprentissage des règles sociales [Nadel, 2006].

C'est un moyen minimaliste : l'attention conjointe est sur l'action, la modalité d'interaction est partagée, la synchronie est parfaite, le tour des rôle est présent, elle est présente dès la naissance.

Dès la naissance le bébé est capable d'interaction avec son entourage social. Cette précocité nous assure de l'absence de protocole appris au cours de ces interactions et en font donc un modèle d'interaction intuitive. Le nouveau né est équipé pour interagir avec le monde physique : attiré par le mouvement, recherchant la nouveauté, discriminant ce qui lui est propre de ce qui lui est extérieur, capable d'apprendre des relations entre ses actions et ses perceptions. Mais il est aussi et spécifiquement équipé pour interagir avec le monde social : attiré par les patterns de visage, attiré par le mouvement biologique, reconnaissant les visages, attiré par la parole, capable de détecter des relations fines entre ses propres actions et les actions de l'autre.

Si le bébé est équipé dès la naissance pour avoir une *embeddedness* sociale très forte, c'est à dire pour avoir une capacité de couplage avec son environnement social, lorsqu'il s'agit d'en expliquer les mécanismes sous-jacents pour reconstruire un agent social et notamment un agent ayant des capacités d'imitation, un des principaux problèmes soulevé est celui de la *correspondance*, correspondance entre son propre corps et le corps de l'autre.

Le problème de la correspondance est intuitivement défini par le fait que pour imiter, dans le sens de reproduire à l'identique, le geste d'un partenaire, il faudrait être en mesure de savoir avec précision quelle partie du corps du partenaire, comme par exemple l'épaule, le coude ou la main, correspond à quelle partie de notre propre corps. Il est vrai que si un agent a une connaissance parfaite de la correspondance entre lui et son partenaire et qu'il est de plus capable de détecter parfaitement les différentes parties de son partenaire, c'est à dire si le problème de la correspondance est résolu alors, il est capable d'imiter parfaitement son partenaire.

En fait le problème de la correspondance n'est pas limité à l'imitation mais touche l'ensemble des interactions sociales dans la mesure où il traduit le problème lié au fait de pouvoir établir des relations entre ses propres actions et les actions du partenaires, éventuellement en dehors de l'imitation.

1.6.2 Le problème de la correspondance un faux débat : l'imitation réciproque une vraie solution.

Nous avons évoqué le problème de l'«avenance» des robots lors d'interactions homme-robots. De ce problème ont surgi des interrogations quant à l'«incarnation» de l'agent. Quelle importance revêt le corps du robot lors d'une interaction ? Existe-t-il des corps plus adaptés à l'interaction que d'autres ? Dans quelle mesure le corps est-il une limite à l'échange entre un robot et un humain ? Pour quelles tâches ?

Le première réponse est que le corps de l'autre a une influence sur notre interaction avec lui. La plus en vue de ces influences touche directement le cortex au niveau des aires prémotrices. Ce sont les «neurones miroirs», situés chez l'homme au sein du cortex prémoteur inférieur, qui réagissent tant au fait d'effectuer soi-même une action qu'au fait de voir cette action effectuée par un congénère (voir [Rizzolatti and Craighero, 2004] pour une revue). En dehors de toute prospective sur les effets que les activations des «neurones miroirs» peuvent avoir sur le reste du cerveau, leur activation est, elle, bien présente et donc l'action de l'autre a bien un effet. Plus qu'un effet du corps de l'autre il s'agit d'un effet de l'action de l'autre. [Rizzolatti and Craighero, 2004] montrent que pour que les «neurones miroirs» d'une personne soient activés, il suffit que l'action observée par cette personne fasse partie de son répertoire moteur. Par exemple, voir l'action de mordre, entraîne l'activation des mêmes zones qu'elle soit effectuée par un humain, un primate ou un chien. Par contre, voir des actes de communication oraux, n'entraîne d'activations dans le lobe frontal que lorsque c'est un homme qui parle. Pour que l'action de l'autre ait un effet, ce doit être une action familière du sujet. Ainsi, ces résultats d'imagerie cérébrale, montrent qu'il y a un effet direct des mouvements perçus mais que cet effet dépend du type de mouvements effectués et non du corps par lequel ces mouvements sont effectués. Il y avait donc plus correspondance entre des actions qu'entre des parties du corps. Qu'il s'agisse de «correspondance du corps» ou de «correspondance des actions», malgré les neurones miroirs, le problème reste entier.

[Alissandrakis et al., 2003b, Alissandrakis et al., 2003a] montrent que le problème des correspondances inter-individuelles peut être résolu de manière simple par l'«imitation propre», par un apprentissage «en ligne» des correspondances dont les critères seraient la synchronie, ou encore en se focalisant sur l'effet du mouvement dans l'environnement plutôt que sur les caractéristiques du mouvements lui-même [Nehaniv and Dautenhahn, 2002]. Notons qu'un autre moyen de résoudre le problème

des correspondances est d'être imité par un agent qui sache déjà résoudre ce problème, alors la correspondance est l'association entre vision et proprioception.

Selon [Bird and Heyes, 2007] les solutions au problème de correspondance seraient apportées par trois type de démarches.

La première, l'«Active Intermodal Mapping», suppose que la première faculté nécessaire à l'*imitation* est l'*identification des parties du corps* («organ identification»), qui permettrait d'associer les parties de son propre corps à celles du corps observé mais dont le fonctionnement n'est pas explicité, puis *la mise en relation de ces parties du corps* («organ relations»), qui permettrait de comprendre le fonctionnement de l'autre à partir de son propre fonctionnement, et enfin, le *babillage du corps* («body babbling»), qui par l'expression de comportements moteurs permet de se construire un répertoire de mouvement et de relations entre membre sur son propre corps.

La seconde, la «Goal Directed Imitation», suggère que les actions perçues sont décomposées en différentes composantes, comme le but de l'action ou les moyens de parvenir à ce but.

La troisième, «Associative Sequence Learning», suggère que le problème des correspondances peut-être résolu par l'apprentissage d'associations entre des représentations sensorielles de l'action lorsqu'elle est perçue auditivement et visuellement («what the action 'looks like'») et des représentations motrices contenant la commande motrice et les informations somatosensorielles qu'elle engendre («what the action 'feels like'»). L'apprentissage de telles associations implique d'avoir vu faire l'action en même temps qu'on l'a faite. Cette solution n'est pas satisfaisante pour deux raisons : la première est que son principe sous-jacent est en fait la construction de représentations du monde, la seconde est qu'elle ne permet pas de rendre compte des *imitations* néonatales de mouvements du visage (protrusions de la langue, gonflement des joues...).

Depuis [Andry et al., 2001, Andry et al., 2002a, Andry et al., 2004, Andry and Gaussier, 2006] ont expérimenté une quatrième manière de résoudre, ou plutôt de ne pas se poser, le problème des correspondances. Ils ont utilisé dans l'environnement visuel de leur robot la région de plus fort mouvement. Et que ce soit le bras du robot ou le bras d'un expérimentateur, c'est cette zone de plus fort mouvement qui est détectée. Ainsi, les perceptions par le robot de son propre mouvement et de celui de l'expérimentateur ne sont pas soumises au problème de correspondance. Si l'on admet que lors d'une action, la zone de plus fort mouvement est bien ce qui est

significatif dans l'action, alors le robot peut imiter l'action de l'homme en évitant le problème des correspondances.

Ainsi nous répondons par la négative à l'ensemble des questions suivantes : faut-il avoir des corps identiques, faut-il les mêmes cinématiques, faut-il être capable de faire des rotations mentales, faut-il un système miroir ?

En fait, plus qu'un simple problème d'associations entre propre corps et corps de l'autre, le problème des correspondances soulève directement la question d'avoir ou non des représentations du monde extérieur fiables et stables auxquelles se fier pour agir. Si le problème des correspondances est résolu a priori alors nous revenons à cette vision du monde comme objectif et pouvant être appréhendé à partir de règles portant sur des symboles, si le problème des correspondances est résolu par le fait que la correspondance se construit ou même émerge au cours de l'interaction alors nous restons dans l'idée que représentation et couplage avec l'environnement ne font qu'un et se construisent grâce à l'action dans l'environnement, physique autant que social.

1.6.3 L'imitation comme modèle de communication

Si l'homme et la machine s'apportent mutuellement les éléments de progression vers un but commun, on pourra parler de coopération entre l'homme et la machine. Cette «coopération» implique une certaine autonomie de la part de la machine qui plus qu'un outil devient une aide et un soutien. C'est cette coopération entre l'homme et le robot que nous visons, une interaction qui soit «intuitive» c'est à dire qui ne requiert pas d'apprentissage, qui ne requiert pas toute l'attention de l'homme, et au sein de laquelle le robot soit un participant actif. Alors l'homme sera en mesure de bénéficier des tâches que le robot saura faire de manière autonome. Il ne s'agit plus simplement d'Interface Homme-Robot (IHR), c'est plus que de l'«Interface», il ne s'agit pas seulement d'utiliser la machine mais bien de coopérer. La nature même de l'interface doit changer, il ne s'agit plus de contrôler le robot au moyen d'un clavier ou d'un joystick, ni de connaître l'état du robot au moyen d'écrans de contrôle ou de LEDs témoins : on quitte donc définitivement le champ du contrôle pour celui des interactions sociales, on quitte définitivement le champs de l'*IA classique* pour celui de la cognition *énactée* du couplage de systèmes dynamiques.

Pourquoi la réponse à notre question passe-t-elle par l'imitation ?

– Parce que l'imitation permet de s'affranchir du problème de la correspondance et

que s'affranchir du problème de la correspondance c'est pouvoir considérer une équivalence entre les différents signaux transmis, indépendamment des modalités (sonore, visuel, proprioceptive)

- Parce que l'imitation est montrée comme un moyen de communiquer dès 2 mois et l'est certainement dès la naissance et donc pour un système, c'est un moyen de communiquer nécessairement intuitif car préalable à tout apprentissage de code d'interaction.
- Finalement et avant tout parce que l'imitation a l'intérêt de présenter des caractéristiques générales de tout système de communication : la synchronie des signaux et le tour de rôle. La différence avec d'autres systèmes de communication concerne les rapports entre les comportements de l'émetteur et ceux du récepteur : les modalités sont similaires dans la communication par l'imitation, différentes et couplées (intermodalité) dans d'autres types de communication. L'objectif ultime, partant du cas basique de la communication par l'imitation, est de parvenir à modéliser le développement d'une communication plus élaborée aboutissant à des propriétés émergentes de l'interaction entre systèmes telle l'attention conjointe et portant un soin particulier à distinguer entre signaux non spécifiques (comme le rythme) et signaux anthropomorphes (mouvements biologiques).

Que ce soit la correspondance, le partage de représentations motrices, le partage d'attention, là où, encore à l'heure actuelle psychologie et robotique répondent qu'ils passent par l'utilisation de protocoles d'interaction, nous choisissons qu'ils soient émergents de l'interaction entre deux agents et non qu'ils en constituent les prérequis.

Dans la majorité des interactions homme-robots existantes, l'homme est un démonstrateur, spectateur du robot et son implication dans l'action ne réside que dans le fait qu'il s'attache à faire réussir au robot une tâche particulière. Il n'est aucunement question pour l'homme de s'impliquer dans l'interaction ou de la modifier pour parvenir à modifier son propre état interne, pour se modifier lui-même. L'homme n'est pas personnellement impliqué dans son interaction avec le robot. L'interaction ne le concerne pas dans le sens où elle le modifie mais uniquement dans les actions qu'il parvient à faire accomplir au robot. L'homme n'est pas en train de faire quelque chose de nouveau malgré lui.

Finalement, utiliser l'*imitation* permet de s'affranchir des représentations symboliques, de la théorie de l'esprit et de voir la communication comme un couplage de

systèmes dynamiques, où chaque agent est un système dynamique qui se construit dans l'action grâce à des boucles perception-action et la communication se construit par la rencontre de deux agents qui en agissant et percevant constituent un système plus large, dont la dynamique émerge des dynamiques propres à ses parties en étant à la fois totalement inédite pour chacune de ces parties et partagée par chacune de ces parties.

1.7 Pourquoi «*ETIS*» et «*Vulnérabilité, Adaptation et Psychopathologie*» ?

Dans une majorité de leurs travaux, l'équipe *neurocybernétique* du laboratoire ETIS de Cergy-Pontoise, prétend approcher la cognition par l'émergence et l'énaction, ne pas chercher à résoudre une tâche robotique particulière bien définie de manière optimale et précise mais plutôt chercher à trouver des principes minimalistes permettent l'émergence de comportements sensori-moteurs simples mais variés et simultanés : suivi de cible, coordination visuo-motrice, imitation. Ils prétendent avoir une approche épigénétique de la cognition, c'est à dire inscrite dans le développement de l'agent sur les bases d'un substrat initial, où les robots soient en permanence «en ligne», non-supervisés. Ils le prétendent et le font, leurs réalisations tombent rarement dans les écueils de l'optimisation et se situent nettement du côté de l'émergence et l'énaction. C'est pour cette raison que cette équipe constitue un soutien essentiel pour s'attaquer au problème de la communication.

Comme nous l'avons vu que ce soit dans la définition de la *communication* ou dans la définition de l'*imitation*, les critiques et les expérimentations de Nadel ont tranché pour une approche de la *communication* humaine en tant que tout dynamique et changeant. Il ne s'agit pas seulement d'élaborer des théories sur comment pourrait fonctionner la *communication* mais bien de soumettre ces théories à l'expérience en se donnant les moyens en terme de méthodes pour obtenir des résultats scientifiquement valable, en évitant les biais de la tâche et de l'observation. C'est cette ancrage profond sur des modèles du développement d'un travail essentiellement expérimental, seul à permettre de confronter ses résultats à la fois à ceux d'autres disciplines comme la robotique et à la réalité de l'humain, qui constituera un atout majeur pour notre travail.

Enfin, ces deux laboratoires ont l'habitude de collaborer étroitement (projets européens, encadrements de thèses etc) ce qui devrait faire de notre travail une partie de

plaisir...

2. DE L'ÉMERGENCE DE LA COMMUNICATION

Nous avons vu que ce qui manque à la robotique est une réelle capacité de *communication*, la possibilité de voir apparaître entre le robot et son interlocuteur (humain ou robotique) des dynamiques et des comportements qui ne soient pas préalablement inscrits dans l'architecture de l'un ou l'autre, qui soient partagés entre les interlocuteurs et qui permettent aux agents de s'adapter l'un à l'autre. Nous avons vu d'autre part que les variables clés de la *communication* sont la *synchronie*, le *tour de parole* et le *partage d'attention*. Enfin nous avons vu que la *communication* était un phénomène émergent de l'interaction de deux partenaires.

Si l'on envisage que ces partenaires soient un humain et un robot, alors il s'agit d'une interaction asymétrique, au sein de laquelle l'humain est un expert tandis que le robot est naïf. L'étude de la communication entre le bébé et l'adulte s'impose alors. C'est, de même qu'avec le robot, une interaction asymétrique entre un expert et un naïf, dans laquelle le naïf est suffisamment équipé pour interagir et suffisamment vierge de tout protocole d'interaction (comme la langue) pour que n'importe quel adulte puisse interagir avec lui, de manière *intuitive*. L'intérêt de l'étude du très jeune humain est en fait double : comme nous l'avons dit, il forme avec l'adulte un système asymétrique comme pourrait le faire le robot, mais en plus, bien que génétiquement optimisé pour l'interaction sociale, au début de son développement les interactions du jeune humain restent relativement frustes, sans protocole appris, sans agentivité ou théorie de l'esprit. Nous pouvons faire l'hypothèse que ces interactions émergent principalement de l'interaction de l'enfant «brut», avec son environnement, ayant appris le moins de choses possibles liées à l'interaction sociale.

Comme nous l'avons souligné section 1.5.4, cette *communication* entre le bébé et l'adulte est encore de nos jours rarement appréhendée dans un cadre laissant la place à sa spécificité dyadique, notamment parce que de telles études requièrent des paradigmes expérimentaux adaptés, non triviaux. Il ne s'agit plus d'étudier l'individu mais le produit

du système qu'il forme avec son interlocuteur. Ce sont les variables caractéristiques de la communication elle-même qui doivent être manipulées, telles la *synchronie*, le tempo, le *tour de rôle* ou l'*attention conjointe*, et ce sont les effets de cette manipulation sur les acteurs de l'interaction qui doivent être mesurés, comme les regards, les sourires, les vocalisations ou les gestes réciproques entre les interlocuteurs. La *Double-Vidéo* est justement un paradigme qui répond à ces exigences et qui permet de mettre clairement en évidence la sensibilité à la *synchronie* de l'enfant dès deux mois.

Composé de trois périodes, ce protocole propose 30 sec d'interaction télévisée entre la mère et l'enfant, puis, sans interruption, l'enregistrement de ces 30 sec est rediffusé à l'enfant, et enfin l'interaction télévisée en direct reprend. Les *variables dépendantes*¹ de cette interaction manipulée, sont chez la mère comme chez l'enfant, le regard (dans les yeux de l'interlocuteur ou détourné) et les expressions faciales (sourires ou grimaces). Les expériences de *Double-Vidéo* sur le développement humain nous montrent que dès 2 mois, le bébé a des attentes de synchronie vis-à-vis de sa mère.

Lors des périodes d'interaction télévisée entre la mère et l'enfant, la mère sourit, parle, est socialement active vis à vis de son enfant mais surtout elle est interactive, ses actions dépendent des actions de l'enfant, elle l'imité, commente ce qu'il fait, répond à ses expressions faciales et à ses mouvements. De même l'enfant regarde sa mère, réagit à ses paroles et ses sourires.

Lors des périodes de *différé* (la mère pré-enregistrée est présentée à l'enfant) la mère sourit, parle, est socialement active vis à vis de son enfant mais elle n'est plus interactive. Seul l'enfant peut regarder sa mère, réagir à ses paroles et ses sourires, seul l'enfant est sous l'influence de la mère. Bien que l'enfant ait toujours la possibilité de réagir au comportement de la mère, il s'en désintéresse significativement, la regarde moins, lui sourit moins et grimace plus (voir fig.2.1 conditions *Différé*).

Si la *double vidéo* répond à la nécessité d'étudier l'individu social dans un contexte social, lorsqu'il s'agit de re-construire cet individu social (comme c'est la démarche en robotique), il devient nécessaire de se poser la question de l'intégration de données multiples au sein d'un tout : dynamiques et informations doivent s'intégrer dans la cohérence et l'unité de l'agent, qu'elles soient exogènes ou endogènes, d'une modalité ou d'une autre. La question est d'autant plus cruciale pour les *interactions sociales* que la *com-*

¹ variable dépendante : variable mesurée lors de l'expérimentation qui est soumise à l'effet des différentes *conditions* expérimentales et qui permet le cas échéant de rendre compte de cet effet

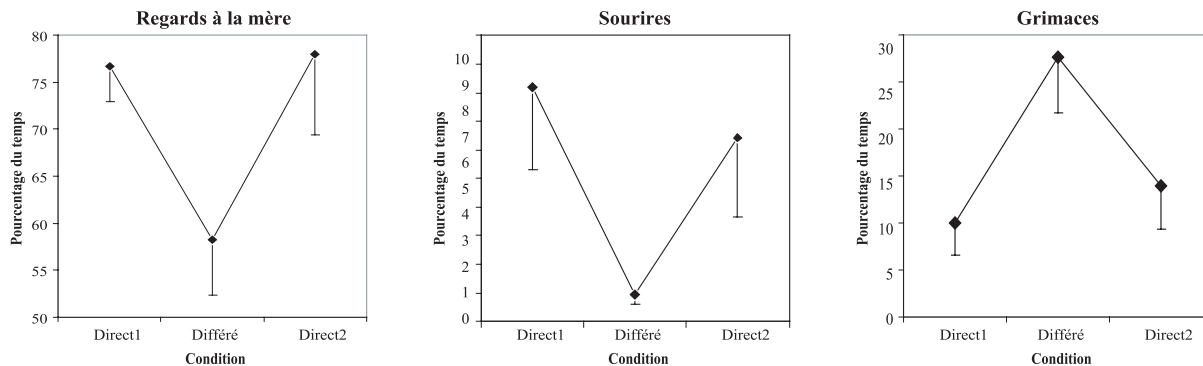


Fig. 2.1: Résultats de l'expérience de *double-vidéo* tirés et traduits de [Nadel et al., 1999a]. La condition de *Différé* (deuxième épisode parmi les trois épisodes consécutifs de 30 sec) montre clairement un désintérêt du bébé (2 mois) pour sa mère lorsque celle-ci n'est pas synchrone : baisse significative du nombre de regards et du nombre de sourires, augmentation significative du nombre de grimaces.

munication est dès 6 mois multimodale, principalement visuelle et sonore, et que cette multimodalité touche directement à la qualité de l'interaction [Muir and Nadel, 1998].

Dès la première semaine de développement le bébé interagit grâce à la modalité sonore (voir fig.2.2). Cette modalité reste la modalité privilégiée de l'interaction jusqu'à la sixième semaine de développement puis l'interaction visuelle prend le pas sur l'interaction sonore. L'utilisation des deux modalités simultanément pour l'interaction sociale n'apparaît qu'à partir de 2 mois. A six mois, la préférence pour l'utilisation simultanée des deux modalités est clairement établie et notamment, la conjugaison des deux modalités engendre plus de sourires chez le bébé que n'en engendrent conjointement l'une et l'autre des deux modalités.

Que ce soit pour les constructeurs d'Interface Homme-Machine ou pour les développementalistes, la conclusion est la même : deux modalités valent bien mieux qu'une. S'agit-il alors de simple redondance entre modalités ? Ou bien, sont-elles complémentaires et ce ne serait pas s'avancer que de dire que le tout est plus que la somme de ses parties ?

Comment concilier alors la nécessité de comprendre l'individu social à la fois dans sa cohérence interne, multimodale, et dans sa fonctionnalité d'interaction.

S'il est certain que la *synchronie* entre partenaires intervient aussi bien lorsque l'interaction est unimodale que lorsqu'elle est multimodale, lorsque l'on se place dans le

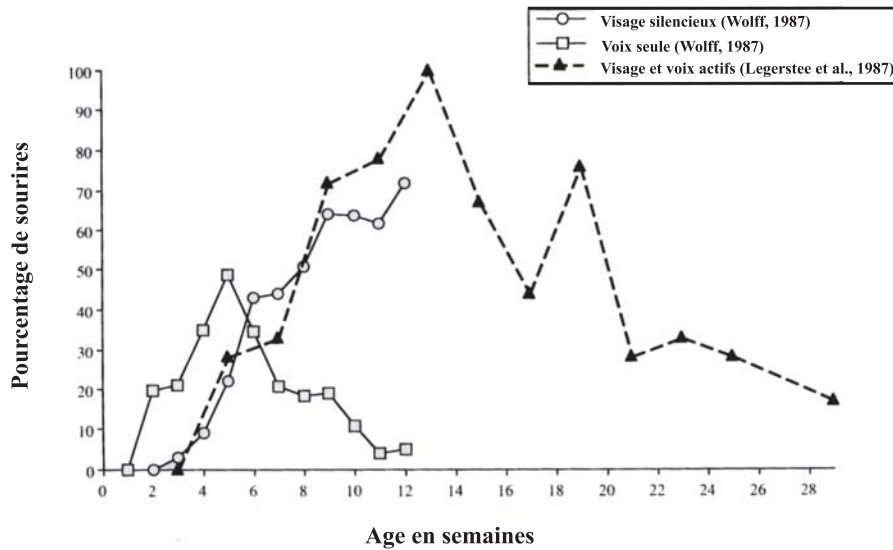


Fig. 2.2: Dès la première semaine de développement le bébé interagit grâce à la modalité sonore. Cette modalité reste privilégiée jusque vers la sixième semaine de développement où le pourcentage de sourires de l'enfant face au visage seul se met à dépasser le pourcentage de sourires face à la voix seule. À partir de 2 mois, les deux modalités sont utilisées simultanément mais ce n'est qu'à partir de 6 mois que le pourcentage de sourires face aux deux modalités présentées simultanément dépasse la somme des pourcentages de sourires obtenus lorsque le bébé est face à l'une et l'autre des modalités : alors seulement la conjugaison des modalités devient plus que leur simple somme. Tiré et traduit de [Muir and Nadel, 1998]

cadre multimodal, que signifie «être sensible à la synchronie»? Est-ce être sensible à la *synchronie* de l'une ou l'autre des modalités ou est-ce être sensible à la synchronie d'un tout émergent ?

L'information de *synchronie* ne doit-elle être tirée que de l'information amodale, tirée de chacune des modalités puis sommée ? Une modalité est-elle sélectionnée parce que c'est la modalité de l'interaction ?

Ainsi, chez le bébé de 6 mois, y a-t-il une détection de cohérence entre les modalités ? Dans quelle mesure une deuxième modalité peut-elle être source de perturbations sur un système stabilisé en interaction avec une unique modalité ? Sur quels critères, sur quelles variables, l'association entre différentes modalités peut-elle se faire, peut-elle se faire grâce à la *synchronie* entre ces modalités ?

2.1 Article1 : multimodalité, synchronie et cohérence de l'individu

Prepin, K., Nadel, J. (soumis). Mother is contingent in more than one way for 6-month-olds. *Submitted*

Mother is contingent in more than one way for 6-month-olds

Mother is contingent in more than one way for 6-month-olds

Ken Prepin^{1,2} Jacqueline Nadel¹

Social interaction is based upon the exchange of contingent signals between partners that are multimodal entities. One topic in the field of early social perception concerns the ability of very young infants to perceive people as coherent multimodal partners. Another topic documents their early sensitivity to contingent signals. Those capacities may lead young infants to capture social contingency as a synchronic combination of different sensory modalities converging to produce an online interaction. Young infants should develop an early awareness of mother as contingent in more than one way, and interacting contingently both with facial expressions and with voice. They should be able to detect a partial violation of social contingency when mother's voice only is contingent but mother's face is not. This case is of special interest because it proposes to the infant a double problem to solve: checking synchrony between self and mother's behaviour (interindividual synchrony) , and perceiving a mismatch between what mother's voice expresses and what her face shows (intraindividual synchrony).

Litterature has not linked these two questions so far. Rather there are two distinct groups of studies: studies of social perception that test how infants relate voice and face, and studies of social cognition that test infants' sensitivity to social contingency. Obviously however the two questions are tightly intermeshed and it is not possible to-date to disentangle what is the influence of one on the other.

The first group of studies provides information about possible preference of one modality compared to the other, or about relationships between both. For instance, at birth, voice is more influent than face. Newborns respond preferentially to speech compared to non-speech (Voulamanos & Werker, 2004), to mother's voice over a stranger's (DeCasper & Fifer, 1980), and at one month they discriminate mother's and stranger's face only if faces are accompanied by the corresponding voices (Burnham, 1993).

With classical experimental procedures using static displays and speech sounds, young infants have been shown to be sensitive to relationships between facial and vocal features of an adult (Bahrick, 2000). More specifically, infants increase attention to a sound matched with lip movements (Dodd, 1979). Similarly, Kuhl and Meltzoff (1982) have demonstrated that 4 month-olds can match a vowel sound with a facial pattern miming the vowel speech. Shifting from static to dynamic displays, Walker-Andrews has presented two pre-recorded faces expressing different emotions accompanied by a voice matching the emotion of one of the two faces (Walker-Andrews, 1997). Infants around 6 months looked longer to the emotional face matching the voice, showing that they have somehow formed a representation of visual and auditory signals as a coherent bimodal dynamics.

Now how does this early capacity to relate face and voice influence interaction with a partner? Studies suppressing a channel in the course of a TV interaction show that if mother's voice is turned off but face remains contingently responsive, infants aged 5-6 months keep gazing and smiling to mother (Hains & Muir, 1996). However, if voice is altered, smile decreases and when mother's face is disturbed, her voice helps the infants to maintain visual attention (see Muir & Nadel, 1998, for a review). Put together, these findings suggest that face alone is sufficient for young infants to communicate but that

¹ Unit CNRS 7593, University P&M Curie, Team Development and Psychopathology, Hôpital La Salpêtrière, 47, Bd de l'Hôpital, F-75013 Paris

² Unit CNRS 8051, University of Cergy-Pontoise, Team Neurocybernetics, ETIS lab, Cergy-Pontoise

Mother is contingent in more than one way for 6-month-olds

intact voice is needed to keep or restore a positive emotional state if a disturbance is introduced in the partner's communication. In all cases, emotional state is modified, not visual attention.

The group of studies exploring early social cognition use TV manipulation of mother's communication to test the infant's sensitivity to maternal non-contingent behaviour. Results show that young infants aged 3 months prefer partners that have produced social contingency over other partners (Bigelow & DeCoste, 2003), and that they detect a non-contingent communication (Bigelow, 2006; Hains & Muir, 1996; Murray & Trevarthen, 1985, Stormack, & Braarud, 2004). Even infants as young as 2 months of age gaze away, stop smiling and grimace when mother's interaction is not contingent (Nadel *et al.*, 1999; Nadel *et al.*, 2005; Soussignan *et al.*, 2006).

In all studies reported above, contingency is an all-or-none phenomenon. Mothers respond with contingent voice and contingent face to the infant's behaviour, or they appear to have non-contingent voice and face. In the two cases, face matches voice. But what happens if mother's communication presents a mismatch between face and voice, with one channel contingent to the infant's behaviour and the other non-contingent? To our knowledge only one study looked at the effect of disruptions in the temporal synchrony of face and voice and showed early reaction of the infants (Cao, 1994).

How do young infants process two disconnected channels that emit simultaneously? And does it make a difference if the two disconnected channels come from the same source (i.e. the infant hears mother's contingent voice and sees mother's non contingent face) or come from two different sources (for example, mother's contingent voice and stranger's non contingent face)? We do not know

much about how young infants react to a multi-participant context. A few studies only have been devoted to early triadic encounters. They have focused mainly on the negative emotional effects of an interruption of the mother's interaction (Murray & Trevarthen, 1985) or on the distributed attention and emotional signals of the infant toward mother and father in the familial mother-father-infant triangle (Fivaz-Depeursinge & Corboz-Warnery, 1999). Transitory exclusion of 11 month-old infants from an interaction between another infant and an adult has uncovered evidence of the infant's growing sensitivity to the question of "who interacts with whom" (Tremblay-Leveau & Nadel, 1995; 1996). With the exclusion paradigm however, partners are contingently responsive to a partner or to another. They remain internally coherent entities as their auditory and visual signals are synchronous components of a bimodal message, and they are externally coherent as they are contingently responsive. What if face and voice are not synchronized but do not come from the same source?

To explore how infants solve the double problem they face when mother is partly contingent only, two TV communication situations were presented to two independent groups of 6-month-olds. In the two experiments, mother's voice remained contingent in the experimental condition, but mother's face was non contingent (experiment 1), or the infant was presented the non-contingent face of a stranger (experiment 2). The hypothesis is that the infants will react negatively to the experimental episode 1 that violates the individual bimodal synchrony between voice and face: voice is contingent and face is not. By contrast, our contention is that infants will accept the experimental episode 2 that present a mismatch between the contingent voice of the mother and the non-contingent face of the stranger, because two different persons are the source of the mismatched channels.. The

Mother is contingent in more than one way for 6-month-olds

two experiments used a revisited version of our double video set up (Nadel et al., 1999).

I. Method

Participants

All participants were dyads of 6 to 7 month-olds and their mother. The infants were all full-term. The mothers had given their informed consent according to the criteria of the ethical national committee.

Experimental design

The double video paradigm designed by Nadel et al. (1999) allows to present to the infant a delayed or replayed sequence of mother's communication without a seamless shift. To evaluate the role of multimodal synchrony in contingency detection, we have updated the design so as to disconnect visual and auditory modalities.

The experiments took place in a setup composed of three independent boxes. In one of the boxes, the infant was sitting in an infant chair in front of a teleprompter that allowed to see the mother at a distance of 50 cms and hear her voice via two microphones at left and right of the screen. In a second box, the mother was sitting in an armchair in front of another teleprompter so as to hear and see her infant. In the third box, an engineer in front of a mixing table presented to the infant the online bimodal communication of the mother, followed by an experimental episode composed of : 1) a contingent online voice and a replayed face of the mother, 2) a contingent online voice of the mother coupled with the prerecorded face of a stranger.

Data recording

Data were derived from infant and mother audiovideo recordings at the eye level.

Coding system

Videocomputer interfacing software already created and used in precedent studies (Kervella & Nadel, 1999) allows us to present simultaneously on the monitor the infant's and the mother's digitized single frames along with the two coding grids. The frames were synchronized according to a LED visual signal. Each 400 ms, a stable frame was automatically presented to the coder who clicked the right item in each of 3 categories : facial expressions (smile, frown, neutral, else), gaze (gaze at the person, gaze away, gaze elsewhere, other), motor activity (self-centred movements, actions, other)

Dependent measures

For the 2 studies, the ANOVAs were conducted with four dependent variables: *Gaze to mother*, *Smile*, *Frown/Grimace*, *Self-centred movements*. The comparisons between studies were performed using test T for independent groups with the four same dependent variables.

Two independent coders, one blind to the aim of the study, coded 25% of the total frames of the two studies with a Kappa agreement of .90 for gaze, .95 for self-centred movements, .84 for frowning and .80 for smile.

II. First study: two modalities contingent versus Voice contingent only

Having designed a TV display that allows us to independently manipulate the contingency of voice and face, we chose for experiment 1 to maintain contingent mother's voice throughout the three episodes of the interaction session and to present a non-contingent (replayed) face of the mother during the experimental episode. Doing so, we did not expect a gaze effect since previous studies have shown that gaze is not modified by various perturbations of mother's face, but we hypothesized an emotional effect that will indicate the perturbation caused by the detection of a violation of intermodal

Mother is contingent in more than one way for 6-month-olds

coherence in mother's facial message compared to the vocal message.

Subjects

Seventeen volunteer dyads of French mothers and their 6-month-olds participated in the study (10 girls and 7 boys). The mothers had previously given their written informed consent concerning the experimental procedure. All mothers had uneventful pregnancies followed by normal deliveries. The infants were all full-term. They were all aged 6 to 7 months (mean age 6M 2W).

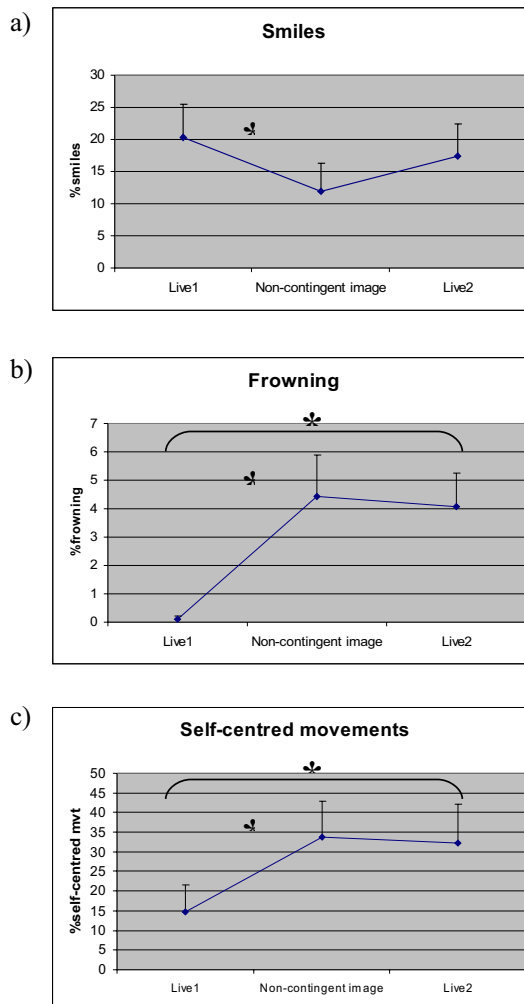
Experimental procedure

During the first and third episodes, infants could see and hear their interactive mother. Mothers had received a description of the experiment before they gave their agreement. In addition we explained to mothers that they will receive a visual signal at the beginning and at the end of the experimental episode online.

Results

Analyses of variance comparing the positive and negative responses of infants in episodes 1 and 2 all showed that infants were upset when their mothers appeared to present a mismatch between her interactive voice and her recorded face, compared to when their mother's face and voice were interactive: smile decreased [$F(2, 32) = 4.5$ $p = .015$], self-centred movements increased [$F(2, 32) = 6.25$, $p = .009$.], and frowning increased [$F(2, 32) = 5.3$ $p = .016$]. Obviously, they were able to detect that the two sensory signals were not co-varying during episode 2. The interaction was disrupted as an effect of the detection of bimodal mismatch (see figure 1,a,b,c).

Figure 1- The effect of a mismatch between a contingent voice and a non-contingent face on smile (a), frowning (b) and self-centred movements (c)



III. Second study

We chose for experiment 2 to maintain contingent mother's voice during the three uninterrupted episodes and to present as the experimental episode the contingent voice of the mother together with the pre-recorded face of a stranger interacting with her infant. In this case, we hypothesized that the mismatch between the familiar voice and the unacquainted face will not to be attributed to a unique source and

Mother is contingent in more than one way for 6-month-olds

therefore that no change in emotional state would appear.

Subjects

Ten volunteer dyads of French mothers and their 6-month-olds participated in the study (3 girls and 7 boys). The mothers had previously given their written informed consent concerning the experimental procedure. The infants were all full-term. They were all aged 6 to 7 months (mean age 6M 3W).

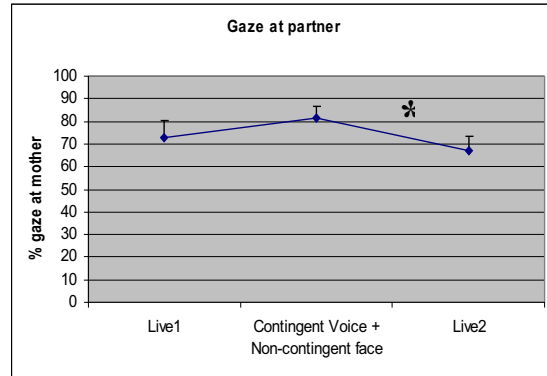
Experimental procedure

The experiment consisted of three uninterrupted 30-second face-to-face interaction episodes. During the first and third episodes, infant could see and hear their interactive mother. The second episode was manipulated in order to present to the infant the bimodal by-product of a mismatch between what she hears and what she sees: infants could hear their interactive mother but saw the recorded face of a Stranger. As for experiment 1, mothers receive a visual signal at the beginning and at the end of the experimental episode to indicate that they have not to communicate with the infant that does not see and hear them online.

Results

The ANOVAS did not reveal any significant differences during the experimental episode and the previous live contingent episode for smile [$F(2,18)=.02$], frowning [$F(2,18)=1.3$], or self-centred movements [$F(2,18)=1$]. There was a gaze effect [$F(2,18)=3.55$, $p<.05$], due to a decrease of attention to familiar mother (moyLive2 = 67% compared to moynon-contingent stranger = 82%) [$F(1,4)=.04$].

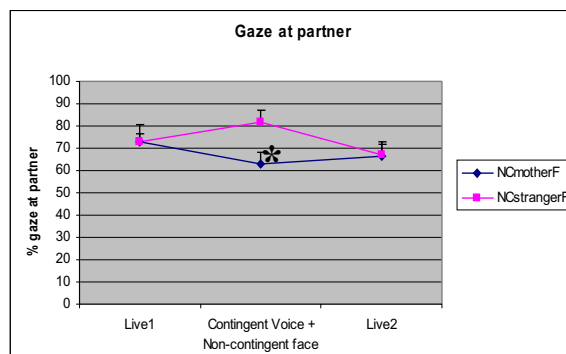
Figure 2 - The effect of a mismatch between the mother contingent voice and a stranger non-contingent face gaze



IV. Comparison between study 1 and study 2

ANOVAS comparing the dependent variables for the two studies showed an effect of gaze that was restricted to the experimental episode: while gaze at mother was remarkably similar for the online contingent episodes, gaze was significantly higher during the mismatch episode for the group of infants that saw the prerecorded face of a female stranger coupled with the voice of their mother [$(1,25)=-2.39$, $p<.025$] (see figure 4). Obviously it was a positive response to novelty.

Figure 3 - Comparison of Gaze to mother in the two experiments

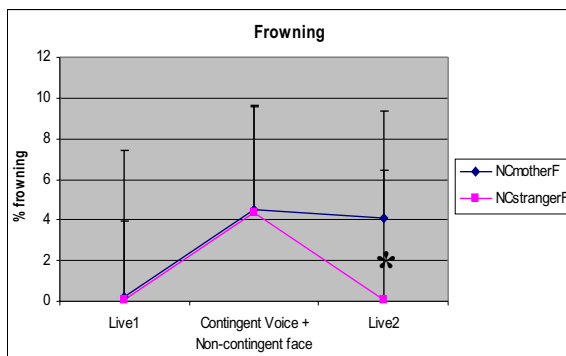


Mother is contingent in more than one way for 6-month-olds

For smile, there was a trend toward more frequent smiling during the mismatch again in the group of infants that saw the pre-recorded stranger [$t(1,25) = -1,77, p < .089$].

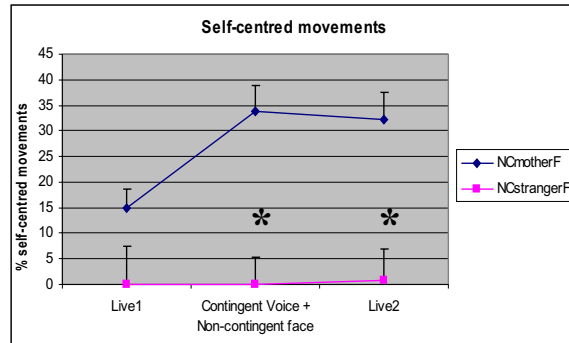
Frowning, as figure 5 shows, was of low frequency in the two studies but remained as an index of persistent emotional perturbation in the group of infants that had previously seen mismatched mother while it disappeared in the other group. Test T shows a significant difference between the two groups during the experimental episode [$t(1,25) = 2,49$].

Figure 4 - Comparison of Frowning in the two experiments



Self-centred movements indicating a stress; distinguish significantly the group of infants who saw a mismatched mother from the group who saw a pre-recorded face of a stranger. The first group showed significantly more self-centred movements during the experimental episode ($[t(1,25) = 2.82, p < .0009]$) and also during the second online contingent episode [$t(1,25) = 2.43, p < .02$] as if it was difficult for them to recover.

Figure 5 - Comparison of self-centred movements in the two experiments



To summarize, the first live conditions did not reveal any significant difference between the two populations of six-month-old infants interacting with their contingent mother via a TV device: the frequency of gaze, smile, frown, self-centred movements were similar in the two populations. The mismatch between contingent voice and non-contingent face of mother disrupted the interaction whereas the mismatch between contingent voice of mother and non-contingent face of stranger did not. The incoherent mother generated stress effects, thus showing that expectancies for contingency were violated. By contrast the coupling of mother's voice and stranger's face, though unexpected, has no stressing effect, but rather an effect of enhanced attention to novelty: the coupling is seen as coming from different sources and thus not violating interactive rules.

The second study, among several conducted in our team was the only one where the infant were perfectly adapted to the situation: no one refused to go on with the experiment, no one cried, no one appeared to be nervous at all. Figure 9 offers a view of two infants, one in front of his mismatched mother (experiment 1), the other in front of the pre-recorded face of the stranger: the contrast summarizes how infants behaved in the two situations.

Mother is contingent in more than one way for 6-month-olds

Figure 6: *Experimental conditions of the two experiments. a) First experiment: the infant faces the contingent voice and the non-contingent face of her mother. b) Second experiment: the infant faces the contingent voice of her mother and the recorded face of a stranger.*



Taken together, these findings are in agreement with the hypothesis that 6-month-old infants have formed the concept of mother as an intermodal entity whose sensorial outputs should cohere in a contingent bimodal response to the infant's behaviour, and clearly distinguish a dysfunctioning intermodal entity from co-occurring sensory messages originating from two different sources.

References

Bahrnick, L. (2000). Increasing specificity in the development of intermodal perception. In D. Muir & A. Slater (Eds.), *Infant development: the essential readings* (pp.119-136). Oxford: Blackwell.

Bigelow, A. E., & DeCoste C. (2003). Sensitivity to Social Contingency From Mothers and Strangers in 2-, 4-, and 6-Month-Old Infants. *Infancy*, 4(1), 111-140.

Bigelow, A., & Birch, S. (1996). The effects of contingency in previous interactions on infants' preference for social partners. *Infant Behaviour and Development*, 22, 367-382.

Burnham, D. (1993). Visual recognition of mother by young infants: facilitation by speech. *Perception*, 22, 1133-1153.

Cao, Y. (1994). Five month-old's perception of asynchrony between face and voice during social interactions. *Infant Behaviour and Development*, 17, 555.

De Casper, A., & Fifer, W. Of human bonding: newborns prefer their mother's voices. *Science*, 208, 1174-1176.

Dodd, B. (1979). Lip reading in infants: attention to speech. *Canadian Psychologist*, 11, 478-484.

Fivaz-Depeursinge, E., & Corboz-Warnery, A. (1999). *The primary triangle : A developmental system view of mothers, fathers and infants*. NY : Plenum Press.

Hains, S., & Muir, D. (1996). Effects of stimulus contingency in infant-adult interactions. *Infant Behavior and Development*, 19, 1, 49-61.

Kuhl, P.K., & Meltzoff, A.N. (1982). The bimodal perception of speech in infancy. *Science*, 218, 1138-1141.

Mother is contingent in more than one way for 6-month-olds

Muir, D. (2004). Infant perception and production of emotions during face-to-face interactions with live and 'virtual' adults. In J. Nadel & D. Muir (Eds.), *Emotional development* (pp.207-233). Oxford: Oxford University Press.

Muir, D.W., & Hains, S. (1999). Young infants' perception of adult intentionality: Adult contingency and eye direction. In P. Rochat (Ed.) *Early social cognition: Understanding others in the first months of life* (pp. 155-184). Mahwah, NJ: Erlbaum.

Muir, D.W., & Nadel, J. (1998). Infant social perception. In A. Slater (Ed.), *Perceptual development : Visual, auditory, and speech perception in infancy* (pp. 247-285). London : Psychology Press.

Murray, L., & Trevarthen, C. (1985). Emotional regulation of interactions between two-month-olds and their mothers. In T. M. Field & N. Fox (Eds.), *Social perception in infants* (pp. 101-125). Norwood, NJ : Ablex.

Nadel, J. (2002). When do infants expect ? *Infant Behavior and Development*, 25, 30-33.

Nadel, J., Carchon, I., Kervella, C., Marcelli, D., & Réserbat-Plantey, D. (1999). Expectancies for social contingency in 2-months-olds. *Developmental Science*, 2, 2, 164-173.

Nadel, J., Soussignan, R., Canet, P., Libert, G., & Gérardin P. (submitted). Two-month-old infants of depressed mothers show mild, delayed and persistent change in emotional state after non-contingent interaction.

Stormack, K., & Braarud, H. (2004). Infants' sensitivity to social contingency: a "double video" study of face-to-face communication between 2-to-4-month-olds

and their mothers. *Infant Behavior and Development*, 27, 195-203.

Tremblay-Leveau, H., & Nadel, J. (1995). Young children's communication skills in triads. *International Journal of Behavioral Development*, 18, 2, 227-242.

Tremblay-Leveau, H., & Nadel, J. (1996). Exclusion in triads : Can it serve « metacommunicative » knowledge in 11- and 23-month-old children ? *British Journal of Developmental Psychology*, 14, 145-158.

Vouloumanos, A., & Werker, J. (2004). Tuned to the signal : the privileged status of speech for young infants. *Developmental Science*, 7, 270-276.

Walker-Andrews, A. (1997). Infants' perception of expressive behaviors: differentiation of multimodal information. *Psychological Bulletin*, 121, 437-456.

2.2 Tentative de conciliation entre synchronie inter-individuelle et multimodalité de l'individu

Si nous avons clairement montré qu'il existe des effets non négligeables liés à l'interaction entre synchronie et multimodalité, nous avons aussi montré que ces effets sont directement liés à la familiarité de l'enfant avec son interlocuteur. Deux étapes dans notre raisonnement : La première est que nous voulons rester dans une communication intuitive, c'est à dire immédiate, sans nécessité d'apprentissage d'un coté comme de l'autre. Il n'est donc pas question ici de se consacrer à la modélisation de la familiarisation de l'agent avec son interlocuteur. Encore une fois, ce qui manque à la robotique pour faire de l'interaction avec l'homme, ce ne sont ni des capacités de développement et d'apprentissage (sur lesquels les papiers ne manquent pas [Schaal, 1999, Weng et al., 2001, Zlatev and Balkenius, 2001, Weng and Zhang, 2002, Pratihar, 2003, Sim et al., 2003]), ni des capacités de reconnaissance de visage (déjà largement étudiées : pour une revue voir [Abate et al., 2007]), mais ce qui manque à la robotique, c'est une aptitude des robots à entrer, au moment même de l'interaction, dans des dynamiques particulières liées aux dynamiques de leurs interlocuteurs². La deuxième étape de notre raisonnement est que en ce qui concerne les interactions sociales, le bébé développe des comportements sociaux de plus en plus élaborés, avec ses proches et tout particulièrement avec sa mère, comportements qu'il généralise ensuite à l'ensemble des individus sociaux.

Ainsi pour être en mesure d'évaluer la distance nous séparant d'un modèle tout à la fois socialement intuitif et multimodal, c'est sur les caractéristiques de l'interaction mère-enfant (et non étrangère-enfant) que nous proposerons un modèle théorique de l'intégration intermodale, mêlée à l'intégration soit-autrui.

Le très jeune bébé est sensible à la synchronie, synchronie entre ses perceptions et ses propres actions, dès deux mois comme le montre la double-vidéo, mais aussi certainement dès la naissance et peut-être même *in utero*.

Un modèle de la communication tel que celui du *couplage entre systèmes dynamiques*,

² Il ne s'agit pas ici de minimiser la difficulté sous-jacente à l'intégration de méthodes d'apprentissage ou de reconnaissance de visages avec un modèle de communication, mais bien de prétendre qu'il est nécessaire, dans un premier temps, de se consacrer à la communication seulement, en s'épargnant ces problématiques.

schématisée par la «boucle d'interaction» de la figure 2.3, s'applique directement aux expériences de *double-vidéo* classique (30 sec de direct, rediffusion de l'enregistrement, 30 sec de direct).

Les périodes d'interaction télévisée entre la mère et l'enfant correspondent à la situation où la *boucle d'interaction* est fermée, l'information se propage tant de la mère à l'enfant que de l'enfant à la mère, chacun est sous l'influence de l'autre et l'effort d'interaction est mutuel : les «systèmes» sont couplés (voir fig.2.1 conditions *Direct1* et *Direct2*).

Les périodes de différé correspondent à la situation où la *boucle d'interaction* est ouverte, seul l'enfant produit l'effort d'interaction (voir fig.2.3), la mère est un «système dynamique» isolé.

L'interaction doit être mutuelle.

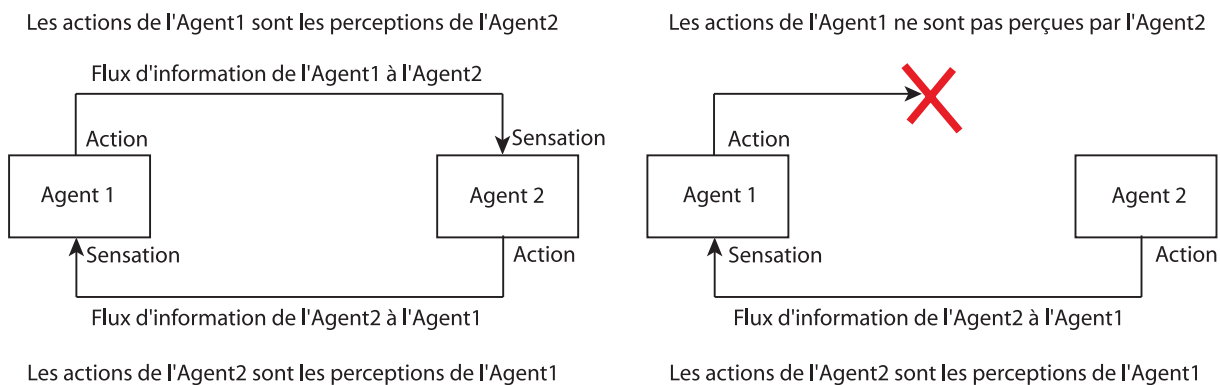


Fig. 2.3: Les systèmes ne sont couplés que si l'interaction est réciproque. Dans l'expérience de double-vidéo, la désynchronisation de la mère (en fait son découplage) détruit l'interaction.

2.3 Article2 : Synchronie inter-individuelle vs Multimodalité de l'individu

Prepin, K., Simon, M., Mahé, A.-S., Revel, A., Nadel, J. (2006). Modelling and testing the effects of a maternal mismatch of face and voice on 6-month-olds' interactions. *In proceedings of the International Conference on Epigenetic Robotics, EpiRob'06*. Paris, september 2006. Vol.128, pp(143-151).

Voir vidéos sur le CD joint :

- La mère et son bébé de 6 mois interagissent en direct grâce au système de double vidéo, «Interaction en direct entre un bébé de 6 mois et sa mère.mpg »
- Le visage enregistré de la mère (le même que dans la vidéo précédente) et sa voix en direct sont présentés au bébé, la mère est déconstruite, «6 mois face à sa mère déconstruite-voix en direct et visage enregistré.mpg »

Modelling and testing the effects of a maternal mismatch of face and voice on 6-month-olds' interactions

Ken Prepin* & **, Maud Simon*, Anne-Sophie Mahé, Arnaud Revel**, & Jacqueline Nadel*
 *UMR CNRS 7593, University P&M Curie, Paris **UMR CNRS 8051, University of Cergy-Pontoise
prepin@ext.jussieu.fr; jnadel@ext.jussieu.fr

Abstract

This paper presents a model of multimodal social agents receiving sensory signals from one or several sources. It emphasizes the role of social interaction to distinguish between co-varying signals (coming from a unique source) and simply co-occurring signals. Two experiments with 6-month-old infants and mother test the model. Results show that infants prefer a bimodal interaction to a unimodal one, but that they prefer a unimodal interaction rather than receiving two disconnected sensory signals coming from the same source, one interactive and the other not. Moreover, young infants react more negatively to the sensory disconnection of the social partner than to two sensory signals that are connected to each other but that are not interacting contingently with the infant's own signals. In other words, infants prefer to be in front of a non-interactive but coherently multimodal mother rather than to be in front of a mother partly interactive but not coherent for the two sensory sources that she emits. This shows that interaction is a main way to attribute coherence to sensory messages and to disentangle co-occurrence and covariation of signals.

Introduction

The recent goal to design robots that are able to cooperate with humans in every day life leads to equip them with social capabilities. Then two interdependent challenges arise: robots have to be accepted readily by humans and to be capable to select in their environment the information relevant to a social interaction with humans.

To be spontaneously accepted by humans, the robot should not monopolize the attention and competences of its interlocutor, the interaction should be intuitive, friendly and resistant to limited perturbations. A response emerges from Human Machine Interfaces (HMI) studies: "Multimodal exchange supports more transparent, flexible efficient and powerfully expressive means of human-machines interactions" (Oviatt, 2002). Intermodal IHM studies stress the robustness as well as the attractiveness of multimodal interactions. Multimodal interfaces are robust insofar as they enable adaptation to a continuously changing environment during visual exploration or

shifts of attention (Oviatt 2000, Holzman, 1999). Multimodal interfaces are attractive in as much as they allow the interacting agents to select and control over how they interact (Fell, et al. 1994, Karshmer & Blattner, 1998, Hauptmann, 1989, Oviatt 1997). If we intend to extend robots' capacities to natural interactions with naïve human agents, multimodality is imperatively needed. The reason why multimodal messages are so useful for interaction, we will claim, is because in a given individual each sensory channel shares with the others amodal parameters such as tempo. The person sends sensory messages that are in temporal harmony one with the other, as if she was conducting an orchestra. This temporal harmony is called synchrony and has brain processors. When receiving multimodal messages from one source, the recipient perceives their temporal harmony and gives corresponding multimodal interactive responses. This means that not only are the sensory channels synchronized in an individual but that they are synchronized between individuals during multimodal interaction. The demonstration that humans have an intuitive and very early sensitivity to interactive multimodal synchrony is provided by developmental psychology in two series of research.

A first series of research focuses on social perception of intermodality. With classical experimental procedures using static displays and speech sounds, young infants have been shown to be sensitive to relationships between facial and vocal features of an adult (Bahrick, 2000). For instance, 4 month-olds can match a vowel sound with a facial pattern miming the vowel speech (Kuhl and Meltzoff, 1982). Shifting from static to dynamic displays, Walker-Andrews has presented two pre-recorded faces expressing different emotions accompanied by a voice matching the emotion of one of the two faces (Walker-Andrews, 1997). Infants around 6 months looked longer to the emotional face matching the voice, showing that they expect visual and auditory emotional signals to present a multimodal coherence.

A second series of research focuses on sensitivity to synchronic (i.e. contingent) interaction. Face-to-face interaction procedures with TV displays allow experimental manipulations of image and voice. One of these manipulations consists in presenting to the infant a non-contingent episode of mother's

communication (i.e. replayed good sample of previous interaction) (Bigelow & DeCoste, 2003; Muir & Hains, 1999; Murray & Trevarthen, 1985). Young infants of different ages including 2-month-olds (Nadel *et al.*, 1999; Nadel *et al.*, 2005; Soussignan *et al.*, 2006), detect a non-contingent communication of the mother: they are sensitive to the temporal delay between what they signal and their mother's response.

What the two series of research teach us is that young infants detect and expect multimodal messages coming from a person, and that they detect and expect sensory signals that respond contingently to their own messages. We do not know much however about the link between the capacity to detect multimodality and the sensitivity to contingent interaction. The aim of this paper will be to investigate this question.

Considering the above mentioned results concerning human development, we will propose a model of intermodal interactions as a background for experiments with young infants. Note that our model does not account for the problem of attention focus during interaction. We will consider that the two agents interact face to face in a dyadic environment, which may solve or at least lessen the attentional problem.

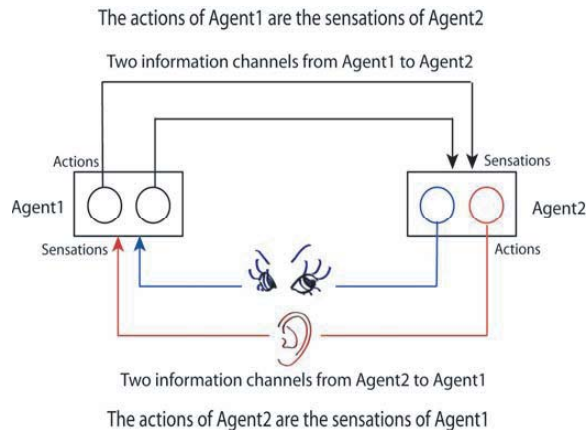


Figure 1: From a dynamical point of view, two multimodal social agents are two dynamical systems exchanging energy through different information channels in an interaction loop.

I. Conceptual model

We propose that two agents, either robots or humans, that are interacting can be considered as two dynamic systems exchanging energy. The two agents exchange energy when visual, auditory or other sensory flows of information are outputs of one and inputs for the other (see figure 1).

Let us consider the dynamic system constituted of the two agents as a whole. Our model aims to make the social interaction be the stable attractor of the “two agents” system. As the attractor of this system depends on each agent dynamic, we build our model from the agent point of view: the model of the agent is energetic and the lowest energy cost is when it multimodally interacts with another agent. If both agents respect this model then the *minimal loss* of energy of the whole system is when the *exchange* of energy between the two agents is *maximal*.

This “minimal loss-maximal exchange of energy” principle induces two assumptions for our model: the agent is both intermodal-synchrony (1) and contingency (2) dependent.

(1) When the agents interact using several modalities, they exchange energy through corresponding energy channels. As a multimodal entity, each system can receive simultaneously several sensory inputs coming from different channels, as well as deliver several outputs on different sensory modalities (see figure 1). The different sensory modalities may relate one to the other, or may not. If they are related, they do not only co-occur but also co-vary, insofar as they share amodal properties such as rhythm or speed: in short, they are synchronised. That is the case when the different modalities come from a unique agent: we talk about “intermodal-synchrony”.

(2) The second aspect of the processing of sensory inputs is their contingency, i.e. the fact that they are involved bilaterally in the interaction. If an input of a *system A* participates in the interaction, the information it contains is related to this *system A*. The input is involved in the closed loop that couples the two agents. In this case, from the *system A* point of view, the actions related to its inputs are closed to its previous actions: the energy consumption within the *system A* to decide of its actions is low and the exchange of energy between the two agents is high. Conversely, if the input of the *system A* does not participate in the interaction, actions related to its inputs are far from its previous actions: the energy used within the *system A* to decide of its actions is high, the energy exchange between the two agents is lessened. It must be noticed that this agent sensitivity and dependency to contingency has already been demonstrated in previous Double-Video and Still-face experiments (Nadel 1999, Tronick 1978).

The two assumptions of the model, contingency and intermodal-synchrony dependency of the agent, enable us to make predictions concerning interactive situations which may test this model:

If the agent faces two contingent and intermodally-synchronous modalities, its internal energy cost will be minimal if it interacts. The attractor of the two-agents system dynamic is the social interaction which forces the agent to interact and synchronise with the incoming modalities.

If *Agent1* faces only one contingent modality (other modalities are not available), the attractor of the whole “two agents” system is the interaction but this attractor may be weaker and less stable than when there are two contingent modalities: the energy exchange is less important with one modality than with two but the agent may interact and synchronise with the available incoming modality.

If *Agent1* faces one contingent modality and one non contingent, the attractor of the “two agents” system induced by the *Agent1*'s dynamic is the interaction using the contingent modality. Yet, this attractor is not stable since its energy cost is high, the exchange of energy is poor (only one contingent modality) and the energy loss within the agent is high (non intermodally-synchronous modalities). In this case our model predicts that the agent should either interact and synchronise with the contingent modality or not manage to stabilise: the attractor of the whole system is not well determined.

Notice that in the trivial case where the *Agent1* faces two non contingent modalities, there is no energy exchange, the *Agent1* dynamic is not sufficient to build an attractor of the whole system dynamic, no interaction is possible.

We will use this model as a background to test the relationships between the early sensitivity to contingent interaction and the early capacity to link two sensory messages as coming from a multimodal agent. For that purpose, we have revisited the Double Video device previously designed to test contingent interaction so that it allows us now to present interactive or non-interactive samples of face and voice coming from the same person or coming from two different persons.

II. Experiments

In our TV experiments, the exchange of energy is processed via two channels: the visual channel where facial and bodily motor outputs of one system are visual inputs for the other(s), and the auditory channel, where vocal and verbal outputs of one system are auditory inputs for the other(s).

Experimental tests of model assumptions

The first assumption of our model of social interactions, contingency dependency, has already been tested (Nadel 1999). Contingency between partners is a prerequisite of the interaction.

The second assumption of our model, dependency to intermodal-synchrony, is the one which will be tested by our human development experiments. To test this assumption, we compared the infant's

response to a both contingent and intermodally-synchronous partner and to a bimodal mismatch of the sensory inputs (mother's interactive voice coupled to recorded mother's face). We also compared interaction with mother voice in live only to multimodal live interaction and to a bimodal mismatch of the sensory inputs.

Population

Thirty-four volunteer dyads of French mothers and their 6-month-olds participated in the study. Eighteen dyads were involved in the first experiment, and sixteen in the second study. All mothers have had uneventful pregnancies followed by normal deliveries. The infants were all full-term. They were all aged 6 to 7 months (mean age 6M 2W).

The mothers had previously given their written informed consent concerning the experimental procedure. This means that they knew from start that the infants will not always be responding to the live of their facial and vocal communicative display.

Experimental design

The experimental design was the upgraded device already described in Nadel et al. (1999). As depicted in Figure 2, three independent rooms in a quiet part of our lab in the hospital were equipped so as to allow to manipulate independently what mother and infant hear and see.

The infant's room was equipped with a baby seat facing a two-way mirror at a 50cms distance. The mirror reflected the mother's image from a TV monitor, obscuring the video camera that recorded the infant, at eye-level. The mother's room was equipped with an arm-chair and a similar set-up.

The recording room was equipped with four video recorders (VR B, VR M, VR&D M, VR BS), a mixer and various amplifiers and control TV screens. VR B recorded the infant while VR M recorded the mother. VR&D_M, Video Recorder and Diffuser of the Mother, is a computer able to record and diffuse at will the mother's face and voice. VR BS, Video-Recorder of the Baby Screen, video-recorded the manipulated video that the baby sees (live, replay or mismatch).

As depicted on Figure 5, sound and image were combined in two different ways on the mixing table: contingent, with live sound and live image, or partially non-contingent, with live sound but replayed image from VR&DM computer.

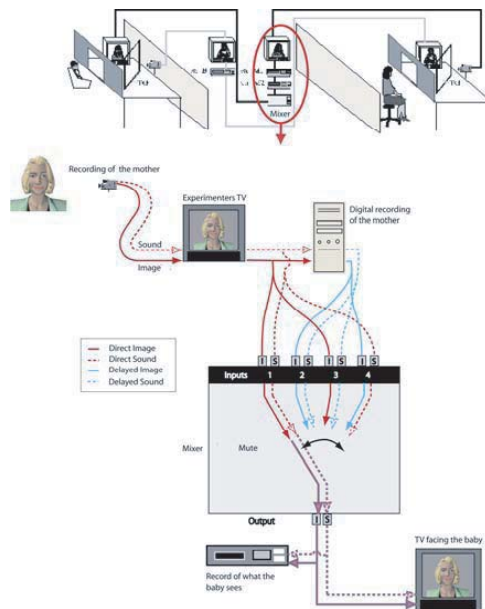


Figure 2: Experimental design with the 3 independent room and a zoom on the mixer. The mixer allows us first a seamless shift from live to recorded video, and second a decoupling of visual and auditory channels.

Experimental procedure

The first experiment consisted of three uninterrupted 30-second face-to-face TV interaction episodes. During the first and third episodes, infants could see and hear their interactive mother. The second episode was manipulated in order to present to the infant the bimodal by-product of a mismatch between what she hears and what she sees: infants could hear their interactive mother but saw her recorded face. Table 1 summarizes the sequences presented according to this experiment

	Episode 1 30 sec	Episode 2 30 sec	Episode 3 30 sec
Exp 1	Mother's face + voice interactive	Mother's voice interactive + face recorded	Mother's face + voice interactive

Table 1- Episodes according to the experiments

In the second experiment, infants could hear their interactive mother but did not see her face.

Data recording

In the recording room (depicted in Figure 2), the engineer had two tasks to fulfill. He first

continuously records the mother (on VR M), the baby (on VR B) and what the baby sees (VR BS) during all three conditions. A LED visual signal indicates the start of the two records. The engineer's second task is to record (on VR&D M) a 30 seconds communicative display of the mother, as soon as a good contact between the mother and infant is established. The criterion for a good contact was the mother talking to her infant and eye-to-eye contact between infant and mother. A judge present in the room signals when a good contact begins and immediately the engineer starts recording the exchange. The VR&D M, using a computer to manipulate video, allows the engineer to use the record immediately. As soon as the first episode of live interaction is 30 seconds long, the engineer switches and presents the coupling of live mother's (or stranger's) voice and recorded mother's (or stranger's) image on the infant's screen. After 30 seconds of this mixed period the switch is pressed again and a bimodal interactive episode of mother (or stranger's) communication is presented to the infant.

This technique of data recording allows us to offer to infant a continuous video presentation of the partner's behavior under both bimodal and decoupled sensory conditions.

Coding system



Figure 3: Coding software.

Video-computer interfacing software already created and used successfully in precedent studies (Kervella & Nadel, 1999) allows us to present simultaneously on the monitor the infant's and the mother's digitized single frames along with the two coding grids (see table 2).

The coding grid was composed so as to allow the coder to depict the frame for each category of behaviour by an item and an item only (Nadel et al.,1999).

Categories	Items
Facial expressions	Neutral Smile Frown/grimace Other
Gaze	Gaze at the person Gaze toward voice (speakers) Gaze away Other Impossible to code
Movements	Self-centred movements Relaxed movements Other

Table 2- Coding grid

The frames were synchronized according to the LED visual signal. For each 400/1000 of a second, a stable frame was automatically presented to the coder who chose for each category the item corresponding to the behaviour. As illustrated in Figure 7, for the category of “facial expression” both mother and her infant were judged to smile.

Dependent measures

For the three experiments, the Analyses of Variances (ANOVAs) were conducted with four dependent variables: Gaze to mother, Smile, Frown/Grimace, Self-centred movements. Self-centred movements are indices of stress in young infants.

Two independent coders coded 25% of the frames with a Kappa agreement of .90 for gaze, .95 for self-centred movements, .84 for frowning and .80 for smile.

Results

We compared the effects of a bimodal social environment where the two modalities are interactive (exp 1, episode 1) to a bimodal social environment where one modality only is interactive (exp 1, episode 2), and to a unimodal social environment where the unique modality in play was interactive (exp 2).

1. Bimodal social environment: two versus one modality interacting.

Analyses of variance comparing the positive and negative responses of infants in episodes 1 and 2 of experiment 1 all showed that infants were upset when their mothers appeared to present a mismatch between her interactive voice and her recorded face, compared to when their mother's face and

voice were interactive: smile decreased [$F(2, 34) = 4.5, p = .02$], self-centred movements increased [$F(2, 34) = 4.0, p = .04$], and frowning increased [$F(2, 34) = 5.2, p = .02$]. Obviously, they were able to detect that the two sensory signals were not co-varying during episode 2. The interaction was disrupted as an effect of the detection of bimodal mismatch (see figure 4,a,b,c).

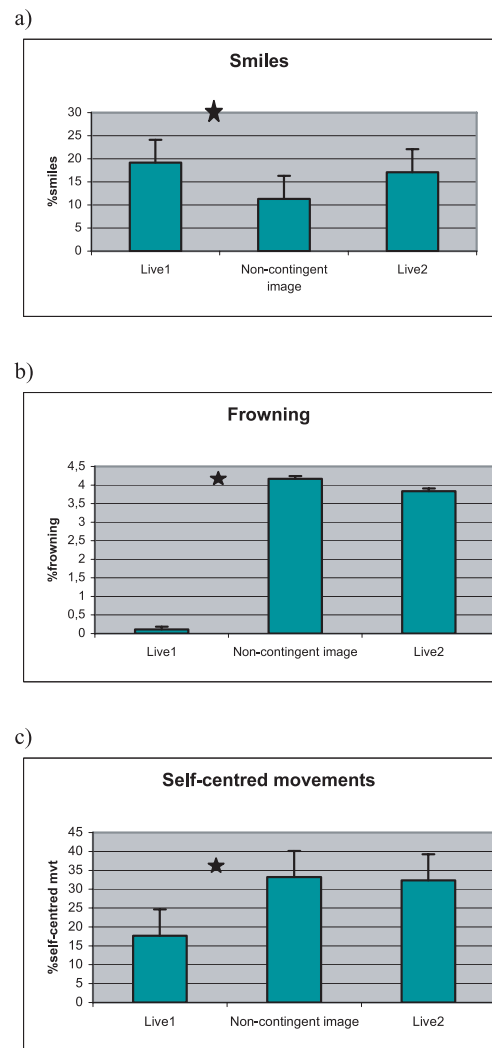


Figure 4- Bimodal mismatch generates the decrease of positive responses (a) and the increase of negative responses (b,c) to the mother

2. Bimodal social interaction versus unimodal social interaction.

Comparing with ANOVAs the positive and negative responses of infants in episode 1 of experiment 1 and in experiment 2, we found a significant difference for frowning/grimacing

[$F(1,32)=7.09$, $p=0.01$] which accounts for the infants being less positively engaged in the unimodal condition (fig.5).

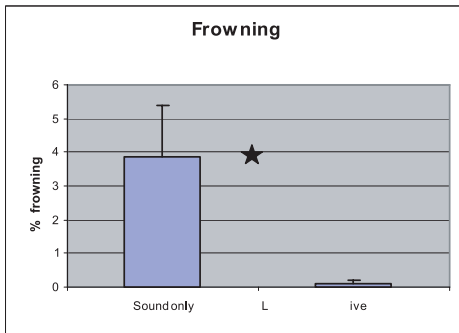


Figure 5- Interaction in an unimodal social environment is less rewarding than interaction in a bimodal social environment where the two modalities are interactive

3. One modality interacting in a bimodal vs. unimodal social environment

When we compared the effect of an interaction with one modality only according to the fact that the social environment was unimodal or bimodal, the analyses of variance showed a significant difference in self-centered movements in the bimodal environment [$F(1,32)=4.93$, $p=0.03$]. Infants were thus more stressed in the condition of a mismatch between face and voice with voice interacting only than in the condition where voice interacts and face is not visible.

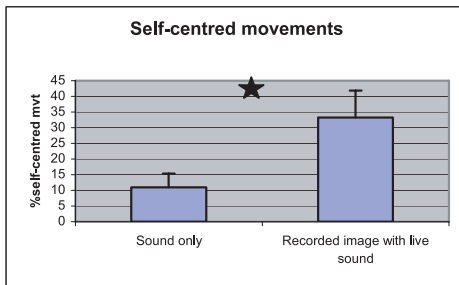


Figure 6- Only one modality interacting is less disturbing in an unimodal social environment than in a bimodal social environment

Our experimentations have shown two things which validate our conceptual model of the social interaction. The first is that the infant is able to interact using only one modality even if this interaction is not as easy as when she can use several modalities. The second thing is that when a

modality is hetero-synchronous, i.e. it is used by both agents to interact together, if a second modality, asynchronous with the first, is added, then the interaction cannot go on. It seems it generates instability in the infant.

III. A model that exploits both multimodality and social interaction

In section I we proposed a coarse conceptual model focused on social interactions. To be much more realistic and to allow easy implementation on robotic systems, we detail here, a model of the social agent which may be involved in these interactions. According to our conceptual model, social interactions consist in the coupling of agents which are dynamic systems exchanging energy. To fit this dynamical model, we referred to “a general class of models that express behavioral decisions in the dynamics of continuously evolving activation fields” (Schöner, Thelen 2006, p.277), the Dynamic Field Theories (Amari 1977). (a) the variables are represented in a continuous metric space; all signals, within the agent, are assigned frequency variables which are continuous, metric variables that indicate their relative distance from one another. Additionally, each of these variables can assume different activations strengths, with an understanding that only variables that reach a particular threshold enter into behavioral decision. Moreover, within a field, interaction between different activation variables can also be specified. (b) the decision process evolves gradually over time: the field models assume that perceptual variables have dynamics, that is, they evolve gradually over time according to some dynamic regime, which may be nonlinear. This assumption of continuous time means that the preceding and the current states of the system are critical: the nearest of the current action are the action decision, the stronger they are into the behavioral decision.

Our social agent is made of three constitutive parts. The first part is the “features extraction” in which the different flows of information are processed so as to extract salient features. The features we are interested in are the frequency and the phase which can be extracted from the signal (see the bottom of fig.7, *Extraction of frequency spectri*). This extraction leads to a dynamic field, the *Input field* (center of fig.7), which combines the input coming from each modality.

The second constitutive part of our model and the most important one is the *Motor planning field* (see the 3D diagram, fig.7). That is the part which implements the “minimal loss-maximal exchange of energy principle”. The *Motor planning field* is a dynamic field as described by Amari which receives two inputs, the *Memory input* and the *Input field* (fig.7 upper part). The *Memory input* is a

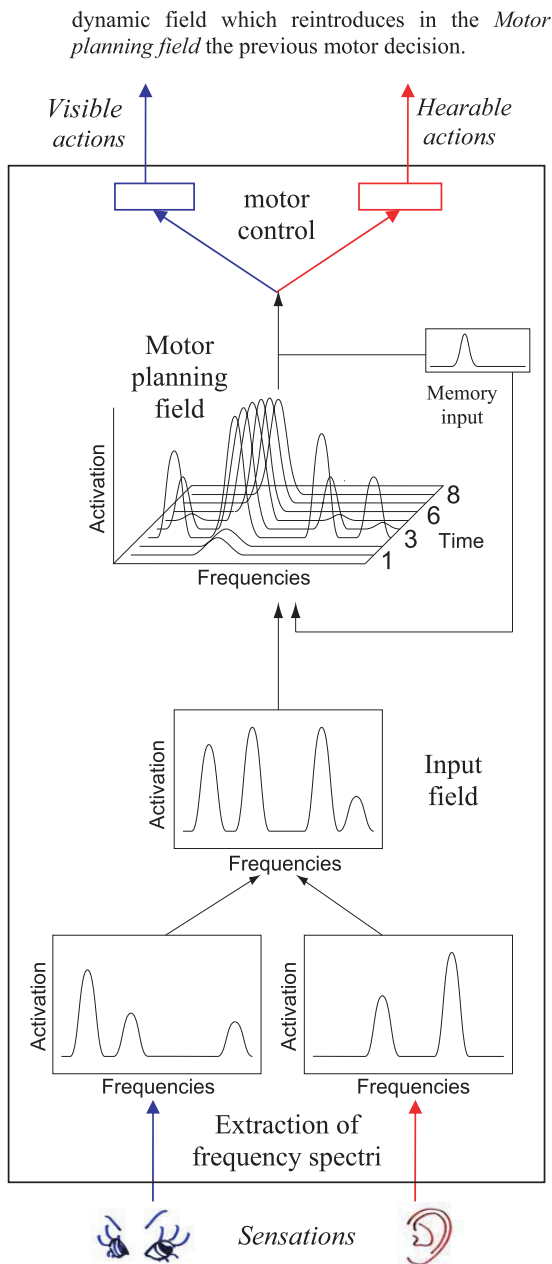


Figure 7- Dynamical model of a bimodal social agent: the “Motor planning field” makes the agent depend to both contingency and inter-modal synchrony.

The third part of our model is the motor control which processes the *Motor planning field* outputs so as to perform the action .

The dynamic properties of our system make it fits the two assumptions of the conceptual model and thus feed our “minimal loss-maximal exchange of energy” principle:

On one hand the *Motor planning field* emphasises the contingent energy flow. The agent’s actions are shaped by what it has most recently done.

Either that consumes energy if its input are not related to its recent action. Or that saves energy if the agent’s inputs are related to its recent actions, that means if its inputs come from a socially interactive second agent. The agent is contingency dependent.

On the other hand, our model of the social agent best processes intermodally synchronous flows. At the level of the *Input field* the combination of the stimuli coming from different modalities may emphasises the properties shared by the different modalities and attenuate the modality-specific properties. Thus in the case of intermodally coherent stimuli, the *Input field* should emphasise specifically properties such as rhythm or synchrony. These properties are the crucial features of the interaction, the ones which enable to define a distance between the current action and the previous ones. The more salient these interaction features are, the more the agent can enter in interaction with its contingent partner. The agent abilities to interact is intermodal-synchrony dependent.

Discussion

Do this latter model of the social agent accounts for our experimental results?

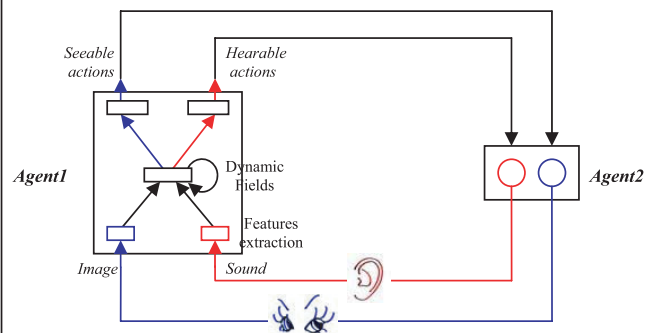


Figure 8- *Agent1* and *Agent2* are interacting: Multimodal stimuli accentuate interaction features detection and thus contingency dependency. The attractor of this two agents system is the interaction.

Let us consider our model of the social agent embedded in the context of an interaction (fig.8). The prediction of our model are that the different interactive conditions will be ranged in the following order:

The condition favouring at best the sensitivity to interaction would be when two modalities are coherent and both interactive. The interaction features are emphasized by the *Input field* and at the level of the *Motor planning field* there is no loss since the action decision is near (in a spatial dynamic field representation) the ongoing action. The medium condition would be when only one modality is available to perform interaction.

The energetic cost at the level of the *Motor planning field* is not null: the *Input field* does not emphasise interaction features and lessen other features, thus the *Motor planning field* has to select within the signal the features of the interaction. The energy cost is higher.

The worse condition would be when two modalities are available in the social environment but only one is involved in the interaction. In this case the energy cost at the level of the *Motor control field* is maximal. Both because the interaction features are not specifically selected by the *Input field* and because the action decision is perturbed by the second modality.

Our experimental results meet the prediction of our interrelated models of the social interaction and the social agent. Indeed, taken together, our results suggest a hierarchy of disturbances linked to the interaction between modality and contingency. The most rewarding condition is when the two modalities provided by the social environment respond contingently to the infant's behaviour, and the most disturbing is when only one of two modalities responds contingently to the infant's behaviour. To sum up, one contingent modality out of 2 < one modality that is contingent < two contingent modalities.

We are aware of the fact that a lot more has to be done before we can more precisely describe the process by which bimodality within one system generates the conditions to detect and achieve contingency between two systems, a step toward an understanding of intersubjective matching.

Acknowledgements- The experiments were part of the European Project ADAPT IST- 2001-37173

References

- Amari, S. (1977). Dynamics of pattern formation in lateral-inhibition type neural fields. In *Biological Cybernetics*, Vol. 27:77—87.
- Bahrack, L. (2000). Increasing specificity in the development of intermodal perception. In D. Muir & A. Slater (Eds.), *Infant development: the essential readings* (pp.119-136). Oxford: Blackwell.
- Bigelow, A.E., & DeCoste, C. (2003). Sensitivity to social contingency from mothers and strangers in 2-4-, and 6—month-old infants. *Infancy*, 4 (1), 111-140.
- Fell, H., Delta, H., Peterson, R., Ferrier, L., Mooraj, Z., & Valleau, M. (1994). Using the babybabble-blanket for infants with motor problems. *Proceedings of the Conference on Assistive Technologies (ASSETS'94)*, 77-84. Marina del Rey, CA.
- Hains, S., & Muir, D. (1996). Effects of stimulus contingency in infant-adult interactions. *Infant Behavior and Development*, 19, 1, 49-61.
- Hauptmann, A. G. (1989). Speech and gestures for graphic image manipulation. *Proceedings of the Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'89)*, Vol. 1 241-245. New-York: ACM Press.
- Holzman, T. G. (1999). Computer-human interface solutions for emergency medical care. *Interactions*, 6(3), 13-24.
- Kuhl, P.K., & Meltzoff, A.N. (1982). The bimodal perception of speech in infancy. *Science*, 218, 1138-1141.
- Muir, D. (2004). Infant perception and production of emotions during face-to-face interactions with live and 'virtual' adults. In J. Nadel & D. Muir (Eds.), *Emotional development* (pp.207-233). Oxford: Oxford University Press.
- Muir, D.W., & Hains, S. (1999). Young infants' perception of adult intentionality: Adult contingency and eye direction. In P. Rochat (Ed.) *Early social cognition: Understanding others in the first months of life* (pp. 155-184). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Muir, D.W., & Nadel, J. (1998). Infant social perception. In A. Slater (Ed.), *Perceptual development: Visual, auditory, and speech perception in infancy* (pp. 247-285). London: Psychology Press.
- Murray, L., & Trevarthen, C. (1985). Emotional regulation of interactions between two-month-olds and their mothers. In T. M. Field & N. Fox (Eds.), *Social perception in infants* (pp. 101-125). Norwood, NJ: Ablex.
- Nadel, J. (2002). When do infants expect? *Infant Behavior and Development*, 25, 30-33.
- Nadel, J., Carchon, I., Kervella, C., Marcelli, D., & Réserbat-Plantey, D. (1999). Expectancies for social contingency in 2-months-olds. *Developmental Science*, 2, 2, 164-173.
- Nadel, J., Soussignan, R., Canet, P., Libert, G., & Gérardin P. (2005). Two-month-old infants of depressed mothers show mild, delayed and persistent change in emotional state after non-contingent interaction. *Infant Behavior & Development*, 28, 418-425.
- Oviatt, S. (2002). Multimodal Interfaces. In J. Jacko & A. Sears (Eds.), *Handbook of Human-Computer Interaction*, IV.A.14. Lawrence Erlbaum: New Jersey.
- Oviatt, S. L. (2000c). Multimodal signal processing in naturalistic noisy environments. In B. Yuan, T. Huang & X. Tang (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Spoken Language Processing (ICSLP'2000)*, Vol. 2, (pp. 696-699). Beijing, China: Chinese Friendship Publishers.
- Oviatt, S. L. (1997). Multimodal interactive maps: Designing for human performance. *Human-Computer Interaction [Special issue on Multimodal Interfaces]*, 12, 93-129.

Schöner, G., Thelen, E. (2006). Using Dynamic Field Theory to Rethink Infant Habituation. In *Psychological Review* 2006, Vol. 113, No. 2, 273–299

Soussignan, R., Nadel, J., Canet, P., & Gérardin, P. (2006). Sensitivity to social contingency and positive emotion in 2-month-olds. *Infancy*.

Tronick, E., Als, H., Adamson, L., Wise, S., & Brazelton, T. (1978). The infant's response to entrapment between contradictory messages in face-to-face interaction. *Journal of American Academy of Child Psychiatry*, 17, 1-13.

Walker-Andrews, A. (1997). Infants' perception of expressive behaviors: differentiation of multimodal information. *Psychological Bulletin*, 121, 437-456.

Comme nous l'avons vu dans notre modèle qui propose une relation entre intermodalité et interaction, l'aptitude du système à extraire de chacune des modalités sonore et visuelle une information amodale, est postulée et non explicitée. L'intégration intermodale est un problème à part entière de la robotique en particulier et des sciences cognitives en générale [Wermeter et al., 2004, Chevallier et al., 2005, Sauser and Billard, 2006]. Nous avons cependant montré qu'il ne suffit pas de récupérer l'information spécifique de chacune des modalités puis d'en extraire une information amodale, dans un espace commun à toutes les modalités, pour résoudre le problème de l'intégration intermodale : synchronie et intermodalité du partenaire interfèrent étroitement lors de l'interaction. Ainsi, bien que la multimodalité soit un paramètre clé de la robustesse et de la qualité d'une interaction sociale, il est nécessaire de commencer par construire un robot unimodal, ou en tous cas dont toutes les *entrées*, quelle que soit leur modalité, soient assimilables³.

La synchronie, perçue dès le plus jeunes âges, rend compte de l'implication réciproque des partenaires, si ils sont tous deux impliqués dans l'interaction alors ils peuvent se synchroniser. La synchronie est d'autre part perceptible par chacun des deux partenaires dans la mesure où, cette «méta»-variable de l'interaction, lorsque l'on se place du point de vue de l'individu, met directement en relation les perceptions d'un agents avec ses propres productions. Ainsi, a priori, une simple comparaison entre action et perception doit permettre de détecter la synchronie.

Assurés que la *synchronie* entre les partenaires doit être tout à la fois un émergent de l'interaction et un régulateur de cette interaction, comment alors, faire «émerger» cette fameuse synchronie lorsqu'un des deux agents est un robot ? En général le problème en robotique est que lorsque le robot interagit avec adulte, l'interaction est, comme vis-à-vis du bébé, asymétrique et l'humain se met à la portée du robot. Il n'est alors pas question d'interaction réciproque. Pour vérifier qu'un robot est bien en mesure d'interagir avec un autre agent en partageant l'«effort d'interaction» il est nécessaire de le faire interagir avec un agent ayant le même potentiel. Nous nous proposons donc de faire interagir deux robots ayant des architectures similaires. L'interaction ne pourra évidemment pas res-

³ Faire que les différentes *entrées* soient assimilables c'est choisir de coder d'une certaine manière l'information visuelle, sonore, tactile etc telles que l'information codée soit transposable d'une modalité à l'autre. Dans ce cas le problème posé par l'intégration intermodale (problème du choix de quelle information peut-être amodale, c'est à dire est significative pour chaque modalité et est une référence au monde commune aux modalités) est résolu par le choix de la manière dont l'information est codée, ou par le choix des capteurs etc.

sembler à une interaction impliquant un adulte puisqu'ici il s'agit bien d'une interaction entre deux agents naïfs, non-experts et interaction sociale.

2.4 De la dynamique de l'individu au tour de rôle de la dyade

Pour décrire le phénomène qu'est la *communication* sans tomber dans le travers des *routines* et d'une communication symbolique, nous proposons de décrire la *communication* comme étant «un couplage entre systèmes dynamiques».

Nous entendons par *système dynamique*, un système pouvant être décrit sous des aspects changeants au cours du temps et ceci de manière déterministe [Pikovsky et al., 1981, Bergé et al., 1997] : l'évolution du dit système peut être décrite par un triplet (T, ϕ, \mathbb{S}) où T est une base de temps, \mathbb{S} un espace d'états et ϕ une fonction qui à chaque état de \mathbb{S} à l'instant t_0 associe un état de \mathbb{S} à l'instant t_1 ($\phi : \mathbb{S} \times T \rightarrow \mathbb{S} \times T$), décrivant ainsi l'évolution du système dans le temps (voir Fig.2.4-gauche).

Étant donné un état particulier s_0 ($\in \mathbb{S}$) d'un système, la dynamique de ce système peut alors être décrite par une trajectoire dans \mathbb{S} , $\phi(s_0, t)$ où t parcourt T , et dont l'origine est s_0 . Nous pourrions alors définir un *bassin d'attraction* du système, comme étant un sous espace \mathbb{S}_0 de l'espace d'états \mathbb{S} tel que l'ensemble des trajectoires dont l'origine est un élément de \mathbb{S}_0 soit contenu dans \mathbb{S}_0 . Un *attracteur* est alors défini comme un sous-ensemble d'un *bassin d'attraction* vers lequel toutes les trajectoires convergent (voir Fig.2.4-droite).

Par couplage entre systèmes nous entendons le fait qu'il y a une interaction réciproque entre les systèmes, c'est à dire que chacun des systèmes modifie la dynamique de l'autre (voir fig.2.5). Si l'on considère deux systèmes, décrits par $(T, \phi_1, \mathbb{S}_1)$ et $(T, \phi_2, \mathbb{S}_2)$ alors nous parlerons de couplage entre les systèmes lorsque ϕ_1 et ϕ_2 dépendent l'une de l'autre. ϕ_1 est alors une fonction de $T \times \mathbb{S}_1 \times \mathbb{S}_2$ dans $T \times \mathbb{S}_1$, et ϕ_2 une fonction de $T \times \mathbb{S}_2 \times \mathbb{S}_1$ dans $T \times \mathbb{S}_2$. Si l'on considère l'un des systèmes, alors la donnée de ϕ ne suffit plus à en décrire la trajectoire dans l'espace d'état.

Chacun des systèmes impliqué dans ce couplage est alors un des partenaires de l'interaction. Il se comporte différemment lorsqu'il est en présence de l'autre système que lorsque qu'il est seul, et ainsi, du couplage émerge une dynamique globale, plus riche que la simple somme des dynamiques des agents, susceptible d'être bénéfique à

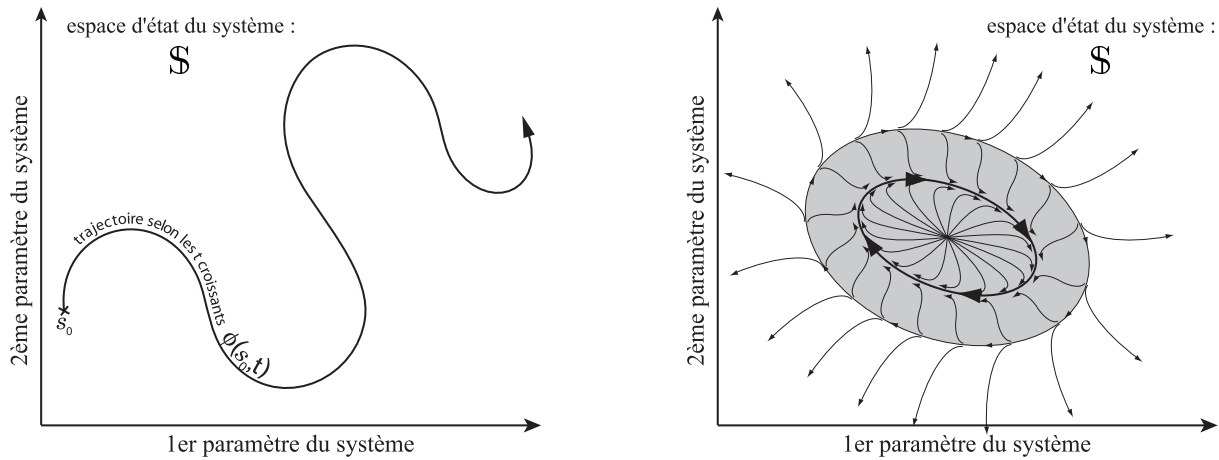


Fig. 2.4: Considérons un système dynamique décrit par (T, ϕ, \mathbb{S}) où l'espace d'état \mathbb{S} est décrit par deux paramètres (et donc peut-être représenté dans le plan). La figure de gauche représente la *trajectoire* décrite par le système dans l'espace d'état \mathbb{S} . Cette *trajectoire* est caractérisée par deux choses, l'état initial s_0 , qui est un point particulier de \mathbb{S} , et par l'ensemble des points $\phi(s_0, t)$ lorsque t parcourt T . La figure de droite représente un *attracteur* et son *bassin d'attraction*. L'*attracteur* est la *trajectoire* cyclique en gras, tandis que le *bassin d'attraction* est la partie grisée de la figure. Les *trajectoires* étant dans le *bassin d'attraction* et seulement ces *trajectoires*, convergent vers l'*attracteur*. Les autres *trajectoires* divergent dans notre exemple mais elles pourraient converger vers un autre *attracteur* (et donc appartenir à un autre *bassin d'attraction*).

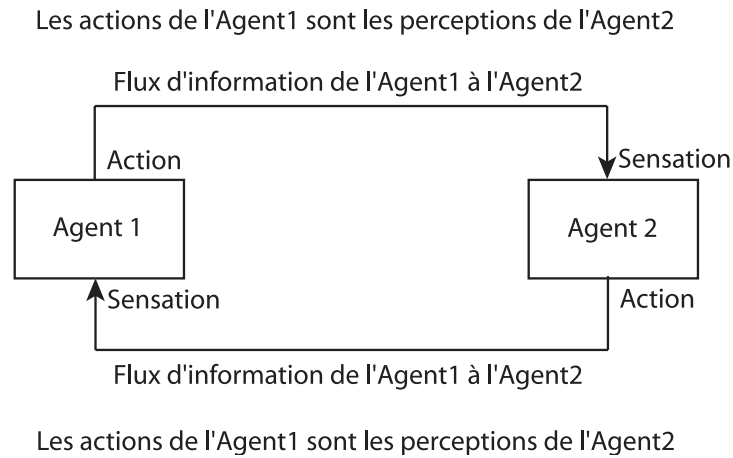


Fig. 2.5: Lorsque deux agents sont en interaction, les sensations de l'un sont directement liées aux actions de l'autre et leur influence est réciproque : plus ils échangent d'information, plus ils s'influencent l'un l'autre et plus ils *communiquent*.

chacun des systèmes. Une «boucle d'interaction» se met en place entre les deux agents, boucle qui comme nous l'avons évoqué section 1.5.3, doit s'«auto-réguler par les signaux qu'elle met en jeu» : l'interaction est un *attracteur* du système constitué des deux agents.

2.5 Tour de rôle

Le couplage suggéré par la *Double-vidéo* manque à la robotique. C'est la réciprocity de l'interaction et de ce fait un des fondements de la *communication* qui est l'enjeu de ce couplage. Nous avons vu que la synchronie est un élément crucial dans l'émergence de ce couplage, pour la communication inter-individus comme pour l'intégration intermodale. Pour construire un modèle de la *communication* dans le cadre de la cybernétique, ceci amène deux questions : Que faut-il ajouter au robot pour qu'il s'investisse dans l'interaction ? Que répond le développement humain ? Quel est le «moteur de l'interaction» ? La question est comment deux systèmes peuvent-ils se rencontrer et se mettre à interagir ? Quelle dynamique est susceptible de conduire à un tel phénomène ?

En fait, deux approches nous ont fait choisir des systèmes oscillants. La simplicité du couplage qui peut exister entre oscillateurs, à l'instar des pendules de Huygens [Huygens, 1669], mais aussi la possibilité de codage des dynamiques sensori-motrices en tant que composées de dynamiques oscillantes, à l'instar de Berthouze [Berthouze and Goldfield, 2007].

«Parler» et «écouter» : une alternance nécessaire

Si l'on peut se poser la question de la «nécessité» d'une *alternance* entre «parler» et «écouter» en ce qui concerne la communication non-verbale, chez l'humain, il est question de tour de rôle dès trois mois (et pendant une courte durée) [de Boysson-Bardies, 1996] comme préparation au langage. Sans se prononcer sur cette nécessité d'alternance entre l'action et l'écoute, nous travaillerons dans le sens d'une *co-existence* nécessaire : chacun des deux agents doit être à la fois actif et réceptif dans l'interaction pour qu'une communication puisse se mettre en place.

En fait deux choses sont intimement liées, le tour de rôle et le fait même de s'influencer mutuellement et de se modifier chacun en conséquence. Plusieurs éléments nous poussent à tenter d'implémenter un tour de rôle entre robots.

Le tour de rôle est un point fondamental de la communication, imitation, langage. Les horloges de Huygens, le mise en opposition de phase d'oscillateurs rend l'obtention simultanée d'une synchronisation et d'une alternance simple et robuste.

Tour de rôle ne dit pas forcément uniquement action ou uniquement réception en fonction du rôle. Il s'agit bien d'obtenir deux choses : la corrélation et le tour de rôle. Ainsi, entre alternance phatique et tour de rôle. L'échelle de temps de l'alternance phatique est de l'ordre de l'échelle de temps de la boucle d'interaction. Comme le montre l'utilisation du Formalisme sur l'architecture pour l'attention conjointe, la boucle d'interaction n'est pas de durée nulle. Malgré l'expertise de l'humain et sa vitesse de traitement des signaux sociaux, s'écoule un certain temps non nul entre sa perception et la modification perceptible de son comportement en conséquence.

Bien que lors d'une imitation synchrone on ne puisse parler vraiment d'arrêt de l'action d'un interlocuteur dans l'attente d'actions de l'autre interlocuteur, il est cependant clair que dans toute modification de trajectoire l'un ou l'autre a l'initiative.

Ainsi les architectures des agents doivent présenter des phases plutôt actives et des phases d'«écoute» et de réceptivité. En effet, nous partons du principe que pour que la communication entre deux agents puisse se faire, l'un doit être actif pendant que l'autre est réceptif, et inversement, étant entendu que l'on envisage l'alternance entre ces deux états. Chaque agent doit donc être en mesure d'être tantôt dans une phase active et tantôt dans une phase réceptive.

Nous noterons de plus que pour observer une communication à double sens et donc un échange des rôles, ces états devront être de nature à alterner. Nous parlons de phases

forcées, car l’alternance si elle n’est engendrée que par des stimuli extérieurs ne permet pas de créer le «vouloir communiquer». Bien entendu ici «vouloir» ne traduit pas une intention quelconque mais l’inclinaison à l’interaction sociale que nous voulons voir apparaître dans le comportement des agents. Ainsi, «vouloir communiquer» nécessite d’être tant «actant» que «à l’écoute».

2.5.1 Inclinaison à l’interaction

L’élément «vouloir communiquer» ou «vouloir interagir» de notre architecture sera donc constitué d’un oscillateur, faisant entrer l’agent soit dans des phases actives, «d’envie de parler», soit dans des phases réceptives, «d’envie d’apprendre», toute deux nécessaires à ce que les agents puissent être en situation d’interaction. Cet oscillateur fera donc changer l’agent de phase à un «rythme naturel du vouloir interagir» (dénomination personnelle) forcé, il s’agit en fait d’un rythme correspondant au rythme du tour de rôle de l’échange. Ce «rythme naturel» pourra être modifié par l’évolution de l’interaction. Nous détaillerons ce point dans la paragraphe suivant.

Dès la naissance, l’humain est équipé pour interagir d’une part avec le monde physique, il détecte le mouvement, il a une préférence pour la nouveauté. Mais il est aussi spécifiquement équipé pour interagir avec le monde social : bien que les premières interactions post-partum soient relativement frustes, nous pouvons parler d’un bébé «génétiquement optimisé» pour l’interaction sociale. Cette «optimisation» est exprimée par le fait que le comportement du nouveau-né est, dans les périodes de veille, nettement orienté vers l’interaction. Les deux agents étant en vis-à-vis, ils modifieront chacun leur comportement jusqu’à parvenir à un échange satisfaisant avec l’autre, c’est à dire jusqu’à ce que les deux agents communiquent sur le même rythme. Le moteur de l’interaction sera considéré ici comme présent dès la naissance, selon les observations citées plus haut sur le rythme de l’interaction.

Le «rythme naturel» du «vouloir communiquer»

L’inclinaison du comportement de l’agent à l’interaction sera générée par un oscillateur faisant alterner «phase active» et «phase réceptive» (voir figure 2.6).

Cet oscillateur influera sur différentes zones de l’architecture globale et pourra lui aussi être influencé par l’évolution de l’interaction.

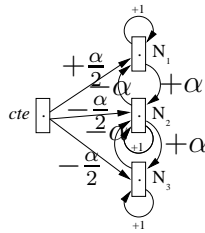


Fig. 2.6: «Rythme naturel du vouloir interagir». L'oscillateur est constitué de trois neurones connectés dans un sens par un lien excitateur et dans l'autre par un lien inhibiteur auxquels s'ajoute une entrée constante caractérisant le rythme des oscillations. D'autres entrées peuvent alors être ajoutées pour influencer la dynamique de cet oscillateur.

2.6 Article3, Tour de rôle entre robots

Prepin, K., Revel, A. (2007). Human-Machine interaction as a model of Machine-Machine interaction : how to make machines interact as humans do. *In : Advanced Robotics. Section Focused on "Imitative Robots (2)"*. Vol.21, No.15 (Dec. 2007)

Voir vidéo sur le CD joint :

- Le turn-taking se met en place de manière robuste au cours du temps, si l'on sépare les robots par un paravent, alors chacun produit sa dynamique propre, lorsque l'on enlève le paravent, ils se perturbent mutuellement jusqu'à rejoindre l'état stable de turn-taking, «Emergence d'un turn-taking entre robots.mpg »

Human-Machine interaction as a model of Machine-Machine interaction: how to make machines interact as humans do

Ken Prepin ^{1,2}, Arnaud Revel ²

¹ *ETIS Lab. CNRS UMR 8051, Cergy-Pontoise, France, <http://www-etis.ensea.fr>, ² UMR7593 Development and Psychopathology, La Salpetriere Hospital, 47, Bd de l'Hopital, F-75013 Paris, and prepin@ext.jussieu.fr, revel@ensea.fr*

Abstract

Turn-taking is one of the main features of communicative systems. In particular it is one of the basis allowing robust interactions in imitation, thanks to its two intricated aspects, communication and learning. In this article, we propose a simple model based on the interaction of 2 neural oscillators inhibiting each other which explain how “turn-taking” may emerge dynamically between two agents. An implementation of the model on a simple robotic platform made of 1 CCD camera and 1 simple arm (ADRIANA platform) is detailed. Results showing the emergence of a “turn-taking” dynamics on this platform are discussed and an extension in simulation for a larger scale of parameters in order to validate robustness is given.

keywords: turn-taking, synchrony, imitation, coupled oscillators

1 Introduction

Our aim is to use the simple format of human communication in order to make machines interact. In this context, turn-taking, which is one of the main features of human communication, must be taken into account in robotics models. In this article, we propose a simple model based on the interaction of 2 oscillators which will explain how “turn-taking” may emerge dynamically between two agents. An implementation of the model on the ADRIANA robotics platform is given and results showing the robustness of the model are discussed.

In the rest of the paper, we first give the physical and psychological theoretical context. We then detail our conceptual model. In section 4, the implementation on a real robot is given. Then, extensive simulations and results are discussed before concluding.

2 Theoretical context

Huygens discovered in 1665 that the pendulums of two clocks hung together anti-synchronize after a while ([Huygens, 1669]). The model of the pendulums anti-synchronization has been given three hundred years later ([M.Bennett et al., 2002]): when the two pendulum oscillate, they make the support move. These movements of the support provide little exchanges and loss of energy between the two oscillators. The furthest from anti-synchrony the pendulum are, the larger the movement is and thus the highest the exchange and loss of energy is. The anti-synchronisation is the unique stable attraction basin of this dynamical system. This explain the Huygens' observations.

The more general issue of coupling between non-periodic oscillators such as chaotic oscillators has been studied by ([Rosenblum et al., 1996, Rosenblum et al., 1997, Ho et al., 2002, Chil-Min Kim, 2003, V.N. Belykh, 2004]) following the pioneer model of *Synchronization in Chaotic Systems* from Pecora and Carroll ([Pecora and Carroll, 1990]). Emerging from these studies, three important aspects should be underlined. First, the coupling between the oscillators is obtained under very few constraints on these two oscillators: they should exchange information (a signal related to each of the internal state of the oscillators must be transmitted to and influence the other oscillator); the global system must be dissipative, and of course, the oscillators should oscillate. Second, the coupled oscillators stabilise in anti-synchronized oscillations (anti-phase synchronization). Third, these experiments permit a synchronization (same frequency and constant phase gap) between the coupled oscillators even if their own frequencies are quite different.

These two last points also appear in the domain of psychological studies of dyadic interactions between humans. Synchrony between partners has been shown to be a necessary condition to enable interaction between an infant and her mother: the infant stops interacting and imitating her mother when the mother stops being synchronous with her, all other parameters staying equal [Nadel and Tremblay-Leveau, 1999, Nadel, 2002, Soussignan et al., 2006]. Moreover, synchrony has been shown to be a premise of the interaction: in Nadel's Still Face experiment, the experimenter faces an autistic child which first ignores her. She then forces the synchrony with the child by imitating him, and the child enters in interaction with the experimenter. They finish taking turns and imitating each other [Nadel, 2000]. This synchronous imitation takes advantage of the two facets of imitation (communication and learning) which provides two roles: the role of imitator and the role of model. By alternating the two roles, they take turns: reciprocal imitation is used as a genuine communicative system where there is no need of an arbitrary set of symbols to interact [Nadel et al., 2004].

Until recently, roboticists have mainly been interested in the learning function of imitation since it is a simple way for a robot to learn from another, and since it has "social" effects by boosting the learning speed in a population of robots [Berthouze et al., 1998, Kuniyoshi, 1994, Schaal et al., 2003]. Moga has shown that a robot can "learn" a sequence of action from another agent (human or robot) but has noticed that while the learning procedure works quite well during an interaction with a human being, it almost does not work in an interaction between two robots [Moga and Gaussier, 1999]. In fact, the

human participating to the interaction naturally formats the interaction by ensuring the synchronisation and coupling with the robot.

The limits of imitative robots concerns how far the interaction between two autonomous robots can go or how far the interaction between an autonomous robot and a naive human can go: the problem rises from the fact that a robot, acting as a model for the imitator, is controlled by an open loop that does not integrate this very imitator! Thus, the dynamics of interaction, intrinsically taken into account by a human teacher, is the unique way for the imitator to learn something.

Taking inspiration from both the physical theoretical framework on oscillators and psychological observations and concepts, we propose a model of the coupling between robotics systems having oscillatory dynamics. The main idea is that each robot could have an internal propensity to “interact” with someone else and thus to be either “sensitive” to the other’s behaviour or, conversely, urged on proposing its own behaviour to another. In our model, each agent propensity to “interact” is controlled by a simple oscillator accorded to a frequency f . When the oscillator is up, the agent acts whereas when the oscillator is down the oscillator stands by. Besides, to model the interaction, each oscillator of each agent may partly be inhibited by the actions of the other agent. Our goal is then to study if synchrony and turn-taking, may emerge from the dynamics of such a simple model.

Practically, each robotic agent is equipped to demonstrate basic movements: an arm with one joint, the shoulder. Besides, each agent has an oscillatory dynamic: the movements of its arm is controlled by an internal oscillator (the agent’s “propensity to interact”). When the oscillator is up, the agent moves its arm as much as it can, and conversely, when the oscillator is down the agent stands by. This results in an alternation of moving vs standing periods. Considering this oscillatory dynamic, our model gives the two agents the ability to exchange and loose energy: both agents are equipped with a camera pointing at the other agent and when an agent sees the other agent moving, this inhibits its internal oscillator. As in the Huygens’ clocks experiments, this may result in an important evolution of the two-agents system dynamics. The inhibition of one oscillator by the other always tends to increase the delay between their highest activations. That makes the system converge toward an anti-synchrony dynamic.

3 Conceptual model

The oscillator is made of three neurons (N_i), powered by a constant signal (cte), which activities are bounded between -1 and 1 . These four neurons activate and inhibit each other proportionally to the parameter α . This model fits the set of equation 2 (see also fig.1-left).

$$\begin{aligned}
 N_1(n+1) &= f(N_1(n) - \alpha.N_2(n) + \alpha/2) \\
 N_2(n+1) &= f(N_2(n) + \alpha.N_1(n) - \alpha.N_3(n) - \alpha/2) \\
 N_3(n+1) &= f(N_3(n) + \alpha.N_2(n) - \alpha/2)
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x < 0 \\ 1 & \text{if } x > 1 \\ x & \text{if } 0 < x < 1 \end{cases}$$

This oscillator produces the sinusoidal signal plotted on fig.1-right.

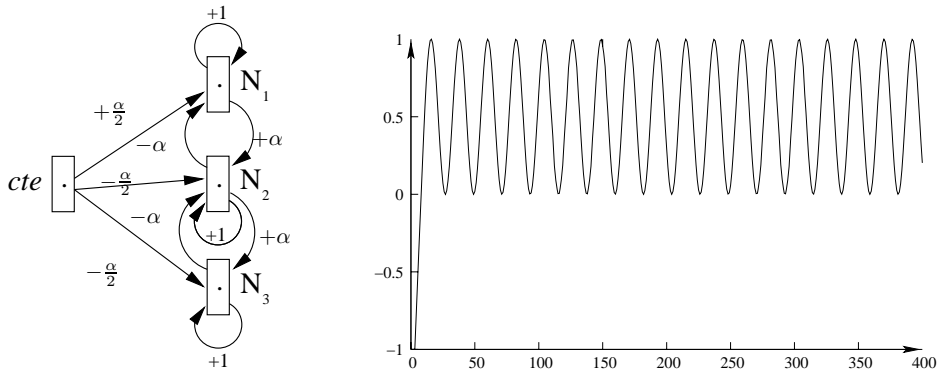


Figure 1: The oscillator is made of three neurons, N_1 , N_2 and N_3 , with a self-connection weighted to 1. Links which weights are $+\alpha$ connect N_2 to N_1 and N_3 to N_2 , and links which weights are $-\alpha$ connect N_1 to N_2 and N_2 to N_3 . A constant input cte activates N_1 with weight $+\alpha/2$, and inhibits N_2 and N_3 with weight $-\alpha/2$.

We tested this model of oscillator when it is submitted to a brief perturbation. The oscillator keeps the phase forced by the external perturbation. Conversely the frequency of the oscillator even after having been modified by an external influence retrieves its default value when the influence stops (see fig.2).

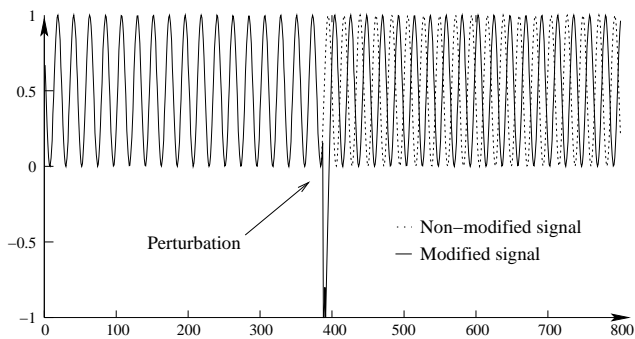


Figure 2: After perturbation happening on neuron N_1 , the phase of the oscillator defers from its initial phase, and if there is no other perturbation it remains constant.

4 Implementation

In order to shift from the conceptual model to a robotics implementation, we must consider how the oscillators and their interaction could be embodied in a concrete robot. Yet, so as to focus only on behavioral effects which are relevant considering the model, the transposition must be almost straightforward (thus, necessarily schematic). The main issue is that the reciprocal influence between the two oscillators has to be mediated by the environment. We must thus think about how each robot could act in the environment and how it can perceive it.

In a previous work, Andry and Gaussier [Andry et al., 2001], following Dautenhahn [Dautenhahn, 1995], have proposed to use a simple homeostatic architecture as a bootstrap for interaction and imitation. The key idea was that a perceptual ‘misunderstanding’ can serve the function of communication between systems. The interaction was mediated by the vision (in particular the detection of movements) on the perception side, and the movements of a robotic arm on the action side.

In our robotic platform ADRIANA (ADaptable Robotics for Interaction ANALysis), the detection of movements and a moving arm are also used to interact (see fig.3).

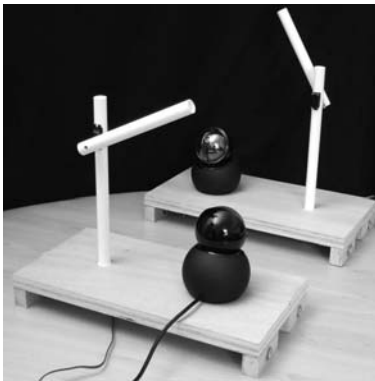


Figure 3: In the present experiment ADRIANA is customized with a single arm for each robot and a webcam which enables the robot to see the other robot but not to see its own arm. The two robots move their arms according to their own dynamic. They influence each other by seeing the movement of the other robot.

Yet, this platform is a more general set of construction especially dedicated to the study of interaction and communication features such as synchrony, rhythm, turn taking, role switching and imitation... In this platform several robots arms with simple joints can be added and arrange at will. The resulting robot can thus have one or multiple degrees of freedom (up to 8), and can demonstrate various motor patterns or dynamical sequences to the agent it interacts with. A webcam can be added behind the arms so as to enable the agent to see its own arms and thus to learn a correspondence between what it does and what it sees. But it can also be added in front of the arms so as not to see them but being able to see another’s movements instead (making possible the correspondence between what is performed and what is perceived). Both the arm and the camera are controlled by our neural networks simulator

Prometheus ([Quoy et al., 1997]).

In this paper, the platform is simplified: each robot has only one arm and the camera is put in front of the arm. Each robot faces the other robot in order to perceive its arm movements. The architecture controlling each robot is composed of two parts: the oscillator (the same as in the previous section) which controls the single arm, and the image processing system which computes the inhibitory signal.

The activation of the oscillator is directly transformed in motor activation. For that purpose, the oscillator controls the arm movements through an *integrate and fire* neuron (see fig.4). Each time the *integrate and fire* neuron fires, the arm moves up and down once. Thus, the frequency of the arm movements directly depends on the activation of the oscillator: the higher the activation of N_1 is, the more frequent the arm movements are. The vision system of the robot should enable to detect the motor activity of the other robot. The webcam we use captures 25 frames per second. The movement detection function of our architecture compares two images every 4 frames. Due to the setup, the movement detected directly depends on the motor actions of the other agent. We then have a sort of frequency coding of the signal: the *integrate and fire* encodes the oscillator activation whereas the *movement detection* decodes this signal considering only binary categories (movement vs no-movement).

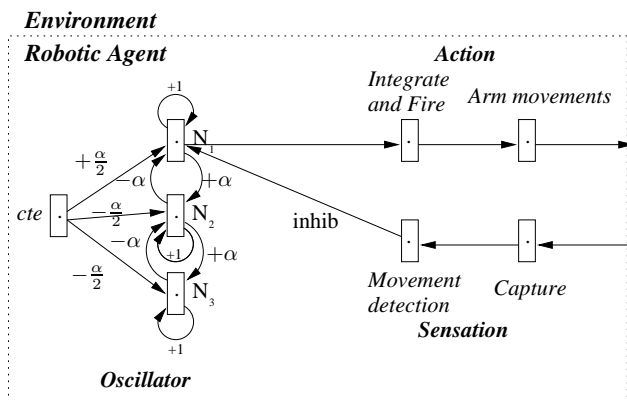


Figure 4: The upper neuron N_1 of the oscillator is directly connected to an *integrate and fire* neuron. Each time the *integrate and fire* neuron fires, the arm moves up and down once.

5 Robotic experiments

We have tested these architecture and setup with two robots having the same oscillator's parameter ($\alpha = \beta$). As shown on figure 6, after a transition period, the two oscillators of the two robots stabilise in anti-synchronization: when one robot moves the other stops and conversely, the two robots take turns.

We want this model to be robust enough to support variability between the agents' frequencies or changing environment, as it can happen in real life communication and imitation and as it is the case in coupled chaotic oscillators ([Chil-Min Kim, 2003, Rosenblum et al., 1997, V.N. Belykh, 2004,

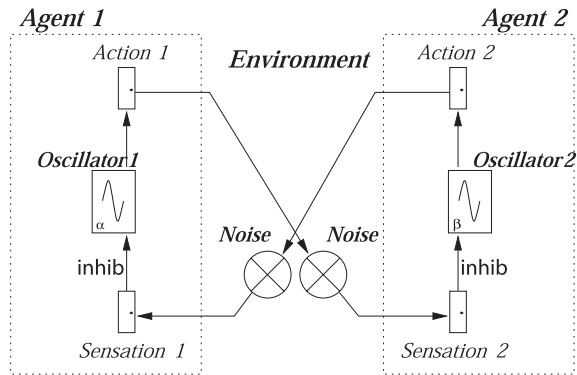


Figure 5: Architecture of the two agents influencing each other. Each agent is driven by an internal oscillator and produces actions depending on this oscillator. A noise due to the environment and the hardware devices appears on the signal between the two oscillators. Note that in simulation this noise has to be simulated to enable the agent to anti-synchronize (see section 5.1).

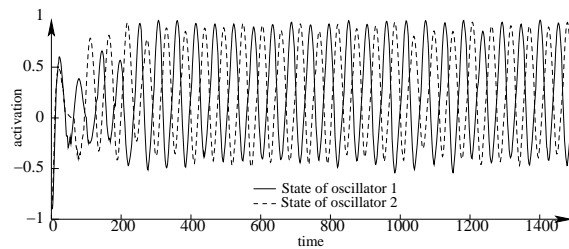


Figure 6: Activation evolution over time of each oscillator of the two systems. The two systems start in the same state: at time $t = 0$ the activation of their oscillator is 0. When the oscillators start to activate, the two robots start to move together, but they inhibit each other and one (here the agent 1) takes the advantage. After a transition period, the oscillators are stabilised in phase opposition: when one robot moves the other stops and conversely, they take turns.

Rosenblum et al., 1996, Ho et al., 2002]). Thus, we have tested the three parameters which might modify the robots capability to enter in a stable dynamic of anti-synchrony:

First, we have tested the reciprocal influence of the two agents (which can change if the attention of the agents to each other changes or if the environment become noisy). This influence is here modulated by the inhibition due to the perception of movement. This parameter is explicitly given by the weight *inhib* of the link between movements detection and N_1 described in the paragraph concerning the implementation (section 4, fig.4).

Second, we have tested the ratio between the frequencies of the oscillators controlling the two agents (two agents may have different internal rhythms, or not the same propensity to interact). The frequencies ratio depends on the two parameters α and β which control each agent oscillator (see figure 1).

Third, we have tested the influence of the noise in the system: this noise is mainly due to the signal of inhibition transmitted from one agent to the other by the mean of *action* and *visual perception*. In the robotic experiment, the noise is due to the environment and the hardware devices: the arms and the cameras.

In order to evaluate the propensity of the *two-agents system* to anti-synchronize, we recorded the activations of each agent's neuron N_1 at each time-step. We characterise the anti-synchronisation state by the fact that it fits two conditions:

First, the two agents must have the same fundamental frequency. We test this property calculating the *fft* (Fast Fourier Transform) of each signal and extracting its maximum value (different from zero) so as to obtain the fundamental frequency of each agent.

Second, the two agents must take turns. We test this property plotting a "*Lissajou*" graph of the two signals $N_{1,1}$ and $N_{1,2}$, i.e. for each time step t we plotted in \mathbb{R}^2 the couple $(N_{1,1}(t), N_{1,2}(t))$. The *Lissajou* plot points out the temporal relations between the two oscillators: a periodic cycle accounts for a stable relations between the oscillators, and if the main component of this cycle is parallel to the second bisector then the oscillators are in phase opposition.

32 experiments were conducted with the robots in order to test the following set of parameters : the frequency ratio $\frac{\beta}{\alpha}$ took the values 1, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2, 4 and 6, (only β varies, $\alpha = 0.1$) the reciprocal inhibition *inhib* took the values 0, 0.1, 0.3 and 0.5. The noise could not be controlled in those robotics experiments since it was due to the environment and the hardware devices. Each experiment was 3000 time steps long and thus took around 12 minutes for a given set of parameters.

The "*fft*" analysis show a wide range of phase lock between the two oscillators: for high values of the reciprocal influence (*inhib* in 0.3, 0.5) the two agents lock on the same frequency (fig.7, middle and right graph) whereas for the lowest value of the reciprocal influence (*inhib* = 0.1) they do not lock for frequencies ratio higher than 4 (fig.7, left).

The *Lissajou* patterns show that the frequency lock of the two agents is associated with a turn taking between the two systems (see figures 8): the two oscillators start with the same initial value ($(N_{1,1}(0), N_{1,2}(0)) = (0, 0)$) and after a transition phase (fig.8-left) stabilise on an cycle which principal component orientation is parallel to the second bisector (fig.8-middle, fig.8-right). That characterizes

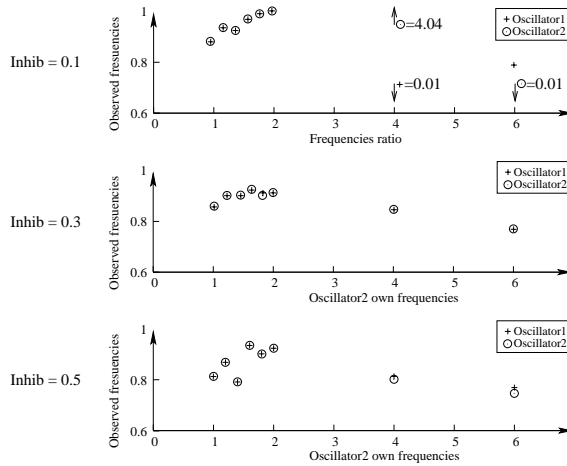


Figure 7: Three graphs representing the frequencies observed of both agents when they interact: on the upper graph the reciprocal influence $inhib = 0.1$, on the middle one $inhib = 0.3$, on the lower one $inhib = 0.5$. The abscissa axis shows the ratio, $\frac{\beta}{\alpha}$, between the frequencies of the two agents: β varies while $\alpha = 0.1$. *Agent1*'s frequencies are plotted with cross and *Agent2*'s frequencies are plotted with circles.

the fact that when one agent acts, the other stands by, and that they alternate.

Even for high differences of frequencies, the *Lissajou* pattern takes values alternatively in the left upper part and in the right lower part of the *Lissajou* graph (see fig.9).

5.1 Complementary simulations

Due to the technical complexity of experiments with real robots, we have only been able to test a few set of parameters (see above). To test more exhaustively the conditions, the robustness and the limits of the anti-synchronization between the two systems, we designed a simulation of the 2 systems in interaction. The noise which naturally appears in the real implementation had to be introduced into the simulation. We then tested a wider range of values of the parameters with a thinner sampling. The frequencies ratio (α/β) was taken between 0.1 and 0.6 with a step of 0.001. The inhibition between the two systems was still varied between 0.1 and 0.5. Since the system is not deterministic due to the noise added in the simulation, we performed these experiments 100 times so as to obtain mean results for each set of parameters. The simulation enables us to limit the duration and the material cost of the experiment: with the robots, each of the $600 \times 3 \times 100$ sets of parameters would have taken 12 min to test and the motors should have been replaced every 25 tests. That means about 1500 days non-stop ($\simeq 4$ years), and 7000 replacement of the motors.

The results on simulation for the values of parameters used in the robotics experiments ($\beta = 0.1, 0.12, \dots, 0.18, 0.2, 0.4, 0.6$) were almost equivalent. Yet, surprisingly, for some of the values (see figures 11 and 12), the results were discontinuous and seem even "chaotic" (the system is both deterministic and

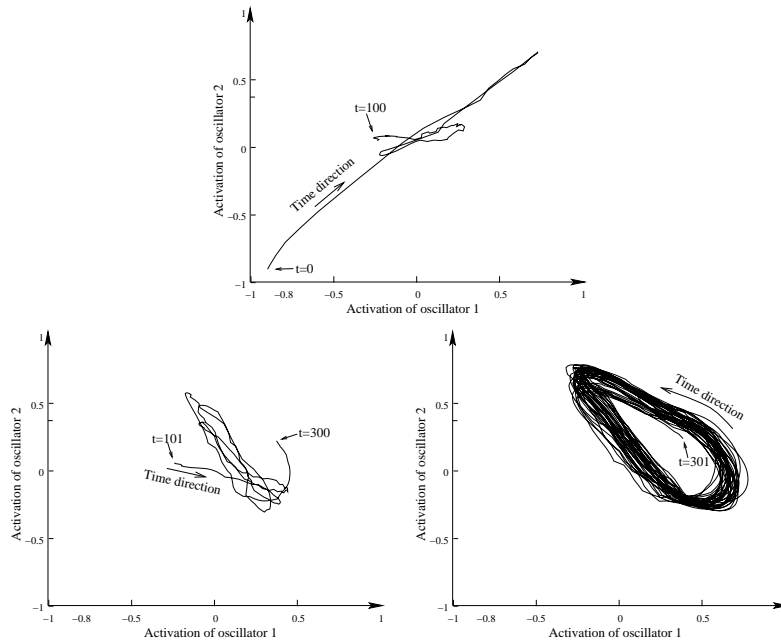


Figure 8: The three graphics show the evolution of the “Lissajou” patterns of the *two-agents system* through time (*Agent1* on X-axis and *Agent2* on Y-axis): from the upper graph to the right graph we have the “Lissajou” patterns during respectively, the beginning ($t \in [1, 100]$), the middle ($t \in [101, 300]$) and the end ($t \in [301, 2000]$) of the experiment. The two oscillators which drive the robots have the same frequency ($\alpha = \beta$) and the reciprocal influence between the robots is medial ($inhib = 0.3$).

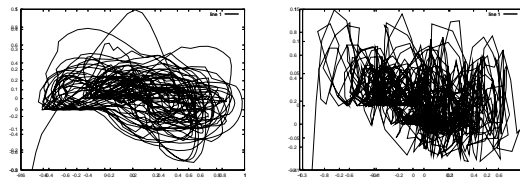


Figure 9: Left: “Lissajou” patterns for a medial ratio of the frequencies of the two agents ($\frac{\alpha}{\beta} = 2$) and a high reciprocal influence ($inhib = 0.5$). Right: “Lissajou” patterns for a high ratio of the frequencies of the two agents ($\frac{\alpha}{\beta} = 6$) and a high reciprocal influence ($inhib = 0.5$)

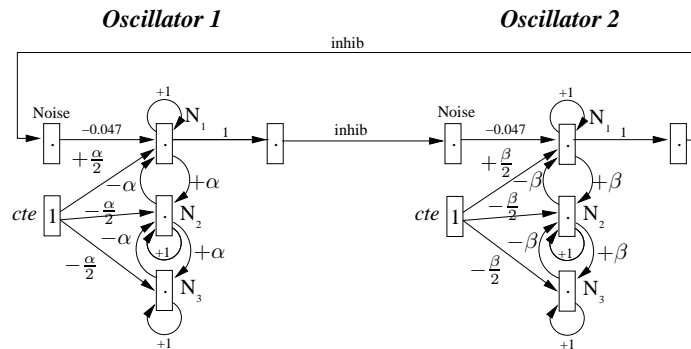


Figure 10: Architecture of the two simulated agents influencing each other. Each agent is driven by an internal oscillator and produces actions depending on this oscillator. Note that, in the robotic experiment, a noise appeared on the signal between the two oscillators, due to the environment and the hardware devices. In simulation this noise has to be simulated to enable the agents to anti-synchronize. The weight value (0.047) between the *Noise* and the neurons N_1 has been determined experimentally from the mean value of the signal detected by the movement detection mechanism during the robotic experiments.

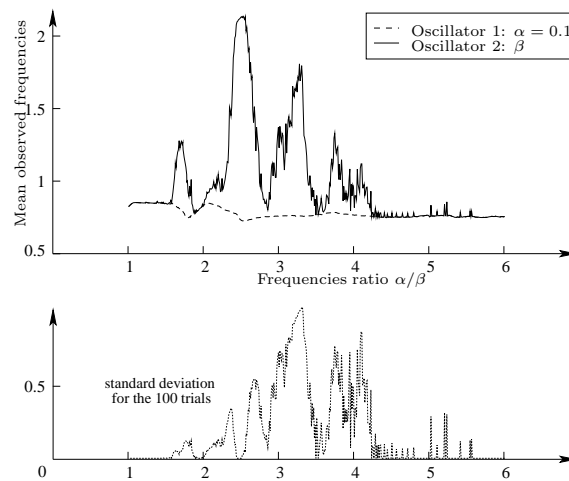


Figure 11: Means of the observed frequencies of the two systems (interacting with a low reciprocal inhibition, 0.1), plotted as a function of the ratio between the agents'own frequencies (α/β): the X axis indicates the ratio α/β , the Y axis indicates the mean frequencies observed on the 100 tests performed with these parameters α and β . The third curve indicates the standard deviation, for the 100 trials, for the observed frequency of system 2.

very sensitive to initial condition, see the *Standard deviations* of figs.11,12). In fact, this phenomenon is similar to the “phase locking of periodic oscillators in the presence of noise” described by *Stratonovich*'s equations in 1967 [Stratonovich, 1967]. In simulation the noise is clearly added whereas in robotic experiment it is induced by sensors, effectors and environment. The regions of synchronization observed in simulation are analogous to the “phase locking domain” described as “tongues” by *Arnold* in 1983: when two periodic oscillators are coupled together there are parameter regions called “Arnold tongues” where they mode lock and their motion is periodic with a common frequency [Arnold, 1983].

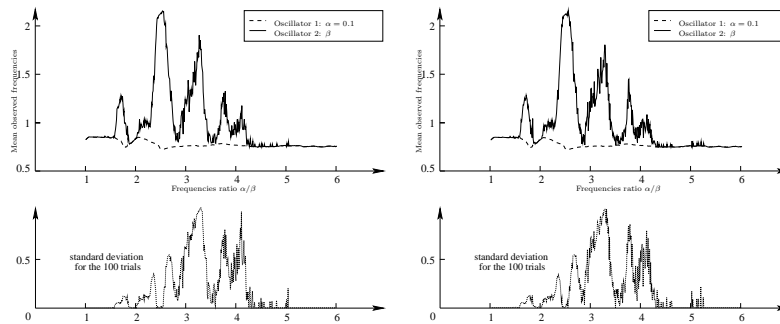


Figure 12: Means of the observed frequencies of the two systems (left: interacting with a mean reciprocal inhibition, 0.3. Right: interacting with a high reciprocal inhibition, 0.5), plotted as a function of the ratio between the agents’own frequencies (α/β): the X axis indicates the ratio α/β , the Y axis indicates the mean frequencies observed on the 100 tests performed with these parameters α and β . The third curve indicates the standard deviation, for the 100 trials, for the observed frequency of system 2.

6 Concluding comments

The results of our experiments suggest that a “turn-taking” behaviour may naturally emerge from the dynamical interaction between 2 oscillating systems. This emerging dynamics have been shown to tolerate a wide range of parameters. This robustness allows the 2 systems to remain in interaction even if the conditions are not ideal: the agent’s dynamics and the environment around the agent may be modified along time. The emergence of turn taking between two systems is a very robust dynamical attractor that can be trusted in order to develop further functionalities upon it (learning of motor repertoires, imitation, role-switching...).

The simple robotic implementation we have chosen (detection of movement and coding of the activation of the oscillator in motor activation) has validated the principle of the model. If the “turn-taking” behavior appeared in the major part of our results, some of the values tested, in simulation only, show a variability of results and no anti-synchronization between the two systems. We propose to come back to the robotics experiment with the values obtained in simulation in order to confirm whether or not such discontinuities exists in a “real” interaction and how they can be overridden. A formal mathematical

description of the interaction may give a basis to understand the convergence of the system.

The model also echoes recent results of psychology indicating that a bottom-up model of exchange of information¹ between dynamical systems may account for the interaction between a child and her mother ([Prepin et al., 2006]). The child and her mother can be seen as two agents which attempt to minimize their internal energy cost, especially minimizing the difference between what they do and what they perceive. When the child and her mother interact they are synchronous and thus the energy cost of the *mother-infant system* is minimized and the information they exchange is maximized. This view also fits physics results on chaotic oscillators which support the idea that the more chaotic oscillators are synchronized, the more information they exchange ([Baptista and Kurths, 2005]).

To implement “exchange of knowledge” capacities on robots, for instance reciprocal imitation, our model and its principles should be transposed in a more subtle fashion. These changes could be performed using robots with more degrees of freedom, able to learn and demonstrate complex sequences of movements [Andry and Revel, 2006], and able to be influenced in two ways: by being imitated and by facing a demonstrator. The internal oscillators of such robots, should control the learning versus demonstrating process of the sequences of movements.

It must be noticed that, even if “turn taking” has not been embedded within the architecture directly, its emergence is basically linked with the existence of an “had hoc” oscillator within the architecture. If the motor activity of a robot is modulated by an internal oscillator, the state of this oscillator can influence an external observer such as another robot and reciprocally. In our opinion, an equivalent oscillatory behavior could emerge from the robot internal dynamics as it seems to emerge in humans, for instance oscillations could emerge from the competition between contrasting motivations. This emerging oscillatory behavior could account for a propensity to communicate with others: for instance there may be oscillation between two state, a “receptive” one and an “active” one. In addition, the introduction of these motivations could accounts for the capacity of the system to engage in and disengage from the interaction.

REFERENCES

- [Andry et al., 2001] Andry, P., Gaussier, P., Moga, S., Banquet, J., and Nadel, J. (2001). Learning and communication in imitation: An autonomous robot perspective. *IEEE transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A*, 31(5):431–444.
- [Andry and Revel, 2006] Andry, P. and Revel, A. (2006). Modeling synchrony for perception-action systems coupling. In *International Conference on Epigenetic Robotics, EpiRob06*, volume 128, page 163. Lund University Cognitive Study.
- [Arnold, 1983] Arnold, V. I. (1983). *Geometrical Methods in the Theory of Ordinary Differential Equations*. Springer, New-York, NY.
- [Baptista and Kurths, 2005] Baptista, M. S. and Kurths, J. (2005). Chaotic channel. *Physical Review E (Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics)*, 72(4):045202.
- [Berthouze et al., 1998] Berthouze, L., Shigematsu, Y., and Kuniyoshi, Y. (1998). Dynamic categorization of explorative behaviors for emergence of stable sensorimotor configuration. In Pfeifer, R., Blumberg, B., Meyer, J., and Winson, S.,

¹In the sense of “information theory”.

- editors, *Proceeding of the Fifth International Conference of The Society for Adaptive Behaviour 98, SAB 98*, pages 67–72.
- [Chil-Min Kim, 2003] Chil-Min Kim, Sunghwan Rim, W.-H. K. J.-W. R. Y.-J. P. (2003). Anti-synchronization of chaotic oscillators. *PHYSICS LETTERS A*, 320:39–46.
- [Dautenhahn, 1995] Dautenhahn, K. (1995). Getting to know each other - artificial social intelligence for autonomous robots. *Robotics and Autonomous System*, 16(2-4):333–356.
- [Ho et al., 2002] Ho, M.-C., Hung, Y.-C., and Chou, C.-H. (2002). Phase and anti-phase synchronization of two chaotic systems by using active control. *Physics letters A*, 296:43–48.
- [Huygens, 1669] Huygens, C. (1669). Instructions concerning the use of pendulum-watches for finding the longitude at sea. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 4:937.
- [Kuniyoshi, 1994] Kuniyoshi, Y. (1994). The science of imitation - towards physically and socially grounded intelligence -. Special Issue TR-94001, Real World Computing Project Joint Symposium, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken.
- [M.Bennett et al., 2002] M.Bennett, M.F.Schatz, H.Rockwood, and K.Wiesenfeld (2002). Huygen's clocks. *Proc. R. Soc. Lond.*, 458:563–579.
- [Moga and Gaussier, 1999] Moga, S. and Gaussier, P. (1999). A neuronal structure for learning by imitation. In Floreano, D., Nicoud, J.-D., and Mondada, F., editors, *Lecture Notes in Artificial Intelligence - European Conference on Artificial Life ECAL99*, pages 314–318, Lausanne.
- [Nadel, 2000] Nadel, J. (2000). The fonctionnal use of imitation in preverbal infants and nonverbal children with autism. In A.Meltzoff and Prinz, W., editors, *The Imitative Mind: Development, Evolution and Brain Bases*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [Nadel, 2002] Nadel, J. (2002). *Imitation and imitation recognition: their functional role in preverbal infants and non-verbal children with autism*, pages 42–62. UK: Cambridge University Press.
- [Nadel et al., 2004] Nadel, J., Revel, A., Andry, P., and Gaussier, P. (2004). Toward communication: first imitations in infants, low-functioning children with autism and robots. *Interaction Studies*, 5:45–75.
- [Nadel and Tremblay-Leveau, 1999] Nadel, J. and Tremblay-Leveau, H. (1999). *Early social cognition*, chapter Early perception of social contingencies and interpersonal intentionality: dyadic and triadic paradigms, pages 189–212. Lawrence Erlbaum Associates.
- [Pecora and Carroll, 1990] Pecora, L. M. and Carroll, T. L. (1990). Synchronization in chaotic systems. *Phys. Rev. Lett.*, 64(8):821–824.
- [Prepin et al., 2006] Prepin, K., Simon, M., Mah, A.-S., Revel, A., and Nadel, J. (2006). Modelling and testing the effects of a maternal mismatch of face and voice on 6-month-olds? In *International Conference on Epigenetic Robotics, EpiRob06*, volume 128, pages 143–152.
- [Quoy et al., 1997] Quoy, M., Gallet, O., and Gaussier, P. (1997). Implémentation parallèle d'un système de focalisation de l'attention. In *Actes du GRETSI'97*, pages 1205–1208, Grenoble, France.
- [Rosenblum et al., 1996] Rosenblum, M. G., Pikovsky, A. S., and Kurths, J. (1996). Phase synchronization of chaotic oscillators. *Phys. Rev. Lett.*, 76(11):1804–1807.
- [Rosenblum et al., 1997] Rosenblum, M. G., Pikovsky, A. S., and Kurths, J. (1997). From phase to lag synchronization in coupled chaotic oscillators. *Phys. Rev. Lett.*, 78(22):4193–4196.
- [Schaal et al., 2003] Schaal, S., Ijspeert, A., and Billard, A. (2003). Computational approaches to motor learning by imitation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 1431(358):537–547.
- [Soussignan et al., 2006] Soussignan, R., Nadel, J., Canet, P., and Girardin, P. (2006). Sensitivity to social contingency and positive emotion in 2-month-olds. *Infancy*, 10(2):123–144.

[Stratonovich, 1967] Stratonovich, R. L. (1967). *Topics in the Theory of Random Noise*. Gordon and Breach, Science publishers, New-York.

[V.N. Belykh, 2004] V.N. Belykh, G.V.Osipov, N. K. B. B. J. K. (2004). Automatic control of phase synchronization in coupled complex oscillators. *Physica D*.

Nous avons vérifié l'hypothèse selon laquelle la communication peut-être modélisée comme un couplage de systèmes dynamiques. *Tour de parole* et *synchronie* émergent tous deux du couplage entre deux systèmes oscillants. Ceci se traduit de manière plus générale par le fait que chaque système dynamique doit posséder deux caractéristiques : générer des dynamiques propres et être sensible à l'autre. C'est ce qu'est pour le bébé une mère socialement active et de plus interactive.

2.6.1 Bilan sur nos oscillateurs

L'influence réciproque est très faible, il s'agit de couplage faible («weak coupling», voir figure 2.7).

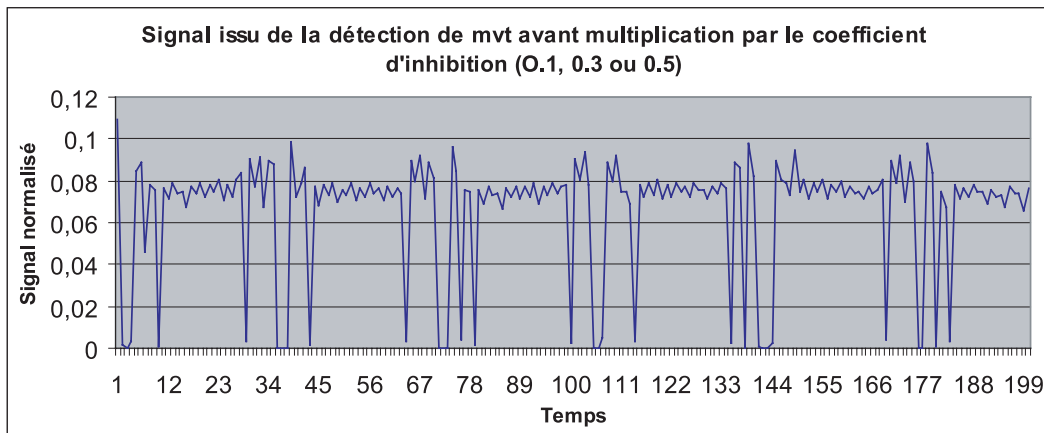


Fig. 2.7: Le couplage entre les deux agents est faible : pour une activité neuronale comprise entre -1 et 1, le signal d'inhibition issu de la détection du mouvement de l'autre agent est de l'ordre de $0,08 * inhib$ ($inhib \in \{0, 1; 0, 3; 0, 5\}$) la majeure partie du temps et seules quelques chutes d'activation à 0 lorsque l'autre agent ne bouge pas viennent influencer sur ce signal.

Ceci nous amène à nous poser une question sur la quantité de signaux échangés entre deux humains qui *communiquent* non-verbalement : si l'on considère l'ensemble des signaux tels que les expressions faciales, les vocalisations et les actions, peut-on en distinguer une part qui serviraient au contrôle de la communication (notamment en assurant les périodes de synchronie entre les agents) et une part qui permettrait l'échange direct d'information entre les agents ? Sans séparer ces signaux peut-on quantifier la part liée au contrôle de l'interaction (à l'alternance phatique⁴) et la part liée à l'échange ?

⁴ Fonction phatique : Fonction du langage dont l'objet est d'établir ou de prolonger la com-

Cette question se pose du fait que le couplage entre systèmes dynamiques peut être fait avec une influence réciproque très faible. Or les signaux échangés entre humains sont nombreux et puissants, par exemple les expressions faciales entraînent une «résonance» chez l'interlocuteur [Simon, 2007].

En fait, des effets tels que la résonance montrent une influence importante d'un agent sur l'autre. La question subsiste alors sur la part de cette influence qui ne fait partie que du mécanisme perceptif (faire et percevoir l'action constitue une unité indissociable) et la part de cette influence qui affecte l'autre, qui change l'autre profondément dans sa production, et dans sa dynamique. Si nous tentons une analogie avec notre, bien sûr trop trivial, modèle de couplage entre oscillateurs, les mouvements de bras seraient bien les expressions faciales de l'agent, la détection de mouvement à partir de l'image reçue par la caméra serait le mécanisme de perception de l'humain qui inclurait la résonance (dans l'hypothèse que nous sommes en train de formuler), et la *faible influence* sur l'oscillateur (mouvement détecté multiplié par un très petit coefficient 0,05) serait l'effet lié à la perception d'une expression faciale chez l'agent.

2.6.2 Relation soit-autrui et synchronie

La *synchronie* a été énoncée par les psychologues du développement comme un élément clé de l'interaction. La *double-vidéo* a montré que cette synchronie est un régulateur de l'interaction, détecté par le bébé dès 2 mois et que sa présence favorise l'interaction tandis que son absence la perturbe. La synchronie est en fait une manière triviale de détecter des relations entre ses propres actions et les actions de l'autre, dans la mesure où c'est la co-occurrence d'événements produits et d'événements perçus qui est détectée. Ainsi être influencé par la *synchronie* entre production et perception c'est être influencé par la relation réciproque existant entre soi et son partenaire.

C'est ce qui conduit à la synchronie. Dans notre cas il n'y a pas de détection de la synchronie, mais une capacité à se synchroniser avec l'autre.

On voit clairement apparaître un tour de rôle. Cette alternance dans la production motrice est elle nécessaire ou bien l'échange entre les deux partenaires pourrait-il être réellement simultané, c'est à dire que l'un et l'autre reçoivent et produisent en même temps? Dans notre perspective où la *perception* est directement liée à l'*action*, agir et percevoir simultanément ne devrait pas poser de problème. Pourquoi alors un tour de

munication entre le locuteur et le destinataire sans servir à communiquer un message. «Allô!»

rôle? En fait dans ce que nous avons modélisé, il y a synchronisation entre les deux partenaires, une synchronisation justement liée au fait que les *perceptions* (détection du mouvement) et les actions (production de mouvements du bras) sont directement liées :

La *perception* de mouvement dans le champ visuel entraîne une baisse de l'activité motrice : les oscillations du robot se trouvent retardées et ralenties si le robot perçoit du mouvement lorsque l'oscillateur qui le contrôle est en phase d'ascension, tandis que les oscillations du robot se trouvent accélérées si le robot perçoit du mouvement lorsque son oscillateur est en phase décroissante. L'effet de cette relation étroite entre perception et action sur le décalage réciproque entre les deux agents est direct, il tend à maximiser leur écart de *phase*.

Pour qu'il puisse y avoir *communication*, il faut nécessairement que les robots «proposent» des dynamiques. Il faut qu'ils produisent un comportement. Pour que les robots puissent se coupler, il faut que ces comportements puissent s'influencer l'un et l'autre. Dans ce travail, nous avons séparé les phases *action* et *réception* de manière à bien mettre en avant le couplage : le couplage se manifeste par l'émergence d'un tour de rôle.

2.6.3 L'interaction, attracteur du système mère-enfant

La situation de couplage réciproque est un attracteur du système constitué des deux agents. Si l'on considère l'espace d'états lié aux paramètres de couplages entre les deux systèmes alors nous pourrions représenter cet attracteur selon le schéma de la figure 2.8.

La figure 2.8 est un schéma idéalisé de ce à quoi pourrait ressembler l'espace d'état du système constitué de deux agents, aux vues de nos résultats.

Pour que le système constitué des deux agents atteigne l'*attracteur* qu'est l'interaction, il faut qu'il prenne une trajectoire qui mène à cet *attracteur*, c'est à dire qui soit dans le *bassin d'attraction* de cet *attracteur*. Dans l'expérience de double vidéo, nous pourrions traduire le découplage de la mère par le fait que l'on force l'ensemble du système mère-enfant à sortir du *bassin d'attraction* de l'interaction.

Sans avoir conclu sur nos observations parce qu'elles n'ont été faites que sur 3 à 4 enfants, la situation de *communication* mettrait bien en jeu des périodes de synchronie parfaite et des périodes de décalage. C'est ce que représente notre schéma, l'*attracteur* que constitue l'*interaction* voit le système constitué des deux agents aller vers le centre de l'espace d'état, qui est le point de synchronie parfaite entre les partenaires, et s'en éloigner dans une relative mesure puis y revenir. Il s'agit là d'une alternance entre la syn-

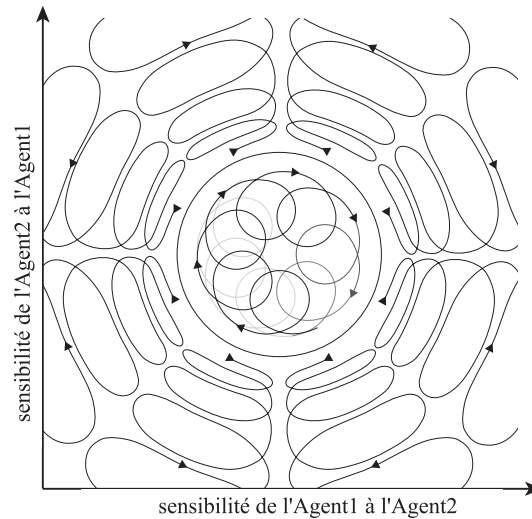


Fig. 2.8: L'*interaction* est un attracteur du système constitué de deux agents, pourvu que les deux agents soient suffisamment impliqués dans l'interaction. Nous avons schématisé cette «implication» dans l'*interaction* par un paramètre de *sensibilité au partenaire*. Plus l'agent est sensible à l'autre, plus il est en attente d'interaction avec lui.

chronie parfaite et la production d'actions nouvelles, «créatives» : c'est cette alternance qui pourrait bien différencier la *communication* de la simple *interaction*, en laissant la place à l'enrichissement mutuel des partenaires (voir section 2.8). Notons que le sens de parcours de l'*attracteur* n'est ici présent que pour faciliter la lisibilité de la courbe.

A l'extérieur du *bassin d'attraction*, l'un au moins des deux agents n'est pas dans l'interaction, et donc l'autre oscille entre recherche de synchronie et désintérêt jusqu'à se désintéresser totalement.

Il serait intéressant de vérifier si on observe bien une alternance entre synchronie parfaite et léger différé, à la fois dans les vidéos issues de la *double-vidéo*, dans les vidéos d'enfants interagissant entre eux et dans les vidéos d'interaction avec des enfants ayant de l'autisme. A première vue, c'est déjà ce qui est décrit par les auteurs lorsqu'ils parlent de l'enfant qui accélère son action pour rattraper l'autre et être à nouveau en synchronie [Nadel, 1986].

2.6.4 Comment la mère et l'enfant se couplent-ils ?

Étant donnée la sobriété de notre modèle de tour de rôle entre robots, se pose la question de sa généralisabilité à l'humain : Dans quelle mesure un humain (enclin à

l'interaction) est-il contrôlé par un oscillateur et principalement sensible à un signal simple comme la quantité de mouvement ?

Pour répondre à cette question, nous avons repris les vidéos enregistrées lors des expérimentations de double-vidéo mettant en jeu l'enfant et sa mère. La première question à laquelle nous avons tenté de répondre est peut-on observer à partir des vidéos un tour de rôle entre la mère et l'enfant ?

Nous avons recodé quatre dyades mère-enfant lors d'un épisode de direct, en utilisant la grille de codage de la table 2.1 qui doit faire ressortir des 30 sec d'interactions les moments de contact visuel, dans lesquels on repèrera les moments d'imitation réciproque, dans lesquels on tâchera de mettre en avant les instants de synchronie parfaite entre les partenaires.

Item	Détail	Durée moyenne
Contact visuel	Premier élément indispensable de l'interaction qui caractérise l'attention réciproque des partenaires	2 à 50 sec
Jeu d'imitation continu	L'attention réciproque des partenaires est interrompue et différentes périodes d'imitations peuvent se mettre en place	$\simeq 10$ sec
Imitation d'une seule pièce	Imitation d'une action unique sans interruption	1 à 2 sec
Synchronie parfaite	Similitude et contingence d'action	$\simeq \frac{1}{4}$ sec

Tab. 2.1: Grille de codage de l'imitation entre la mère et son enfant. Les critères sont classés par ordre croissant de contingence entre les agents en interaction.

Si il apparaît clairement que les périodes d'imitation et de synchronie parfaite sont en plus grand nombre pendant les phases de direct que pendant les phases de différé, il est par contre immédiatement apparue, lors du codage, une difficulté majeure consistant en déterminer qui de la mère ou de l'enfant est celui qui est à l'origine d'une imitation, et établir par là comment sont distribués les rôles entre la mère et l'enfant. En effet la mère est toujours active et interactive lors du direct, tandis que l'enfant ne réagit à la mère que par intermittence : toute action de l'enfant est accompagnée d'une imitation de la mère tandis que toutes les actions de la mère ne sont pas accompagnées d'une

imitation de l'enfant bien qu'il soit vraisemblable que ce sont les sollicitations répétées de la mère qui sont à l'origine de l'action de l'enfant.

Comme nous l'avons souligné section 2, tout comme l'interaction entre un robot et un humain, l'interaction entre un bébé et sa mère n'est pas symétrique. Le premier agent est naïf tandis que le second est expert. Ceci est notable dans les *rôles* que jouent la mère et son enfant dans l'interaction. La mère est le principal générateur de nouveauté de l'interaction tout en étant celui des deux agents qui se met le plus à la portée de l'autre. Mais, bien que ce soit la mère qui stimule l'interaction, une alternance devrait être visible entre les interlocuteurs : on ne parlera donc pas de «tour de rôle» dans la mesure où lors d'interaction avec de très jeunes enfants, c'est toujours l'adulte qui «a la main» et dont dépendent la prolongation et l'intérêt de l'enfant pour l'interaction. Ce qui alterne entre une mère et son enfant, ce sont des signaux non-verbaux qui permettent de réguler l'interaction et qui sont en même temps les constituants de l'interaction. Bien que le terme de «phatique», désignant ou qualifiant un signal péri-verbal de régulation-prolongation de l'interaction, soit en général employé dans un contexte verbal [Cosnier and Brossard, 1984] il est aussi adapté à l'interaction non-verbale au sein de laquelle les signaux de l'interaction font à la fois office de signal échangé et de signal régulateur. Le *phatique*, ou *signal phatique*, est de plus caractérisé par l'instant où il est émis qui précis plutôt qu'étendu dans le temps. Plutôt que de «tour de rôle» ou de «tour de parole», nous parlerons donc plutôt d'«alternance phatique» entre les partenaires de l'interaction. Le *tour de rôle* apparaît sous une forme réellement différenciée de l'*alternance phatique* vers trois mois lors de productions orales [de Boysson-Bardies, 1996] : mère et enfant se répondent en vocalisant chacun à leur tour. Cette conduite ne dure que deux à trois semaines.

Nous avons codé quatre dyades mère-enfant lors d'un épisode de *direct* de l'expérience de double-vidéo. Nous avons codé les actions de la mère et de l'enfant susceptibles de faire apparaître l'*alternance phatique* en utilisant la grille de codage des actions 2.2 en espérant faire ressortir les variations de vitesse de l'interaction, qui seraient plus susceptible de montrer l'alternance entre la mère et l'enfant que les actions elles-mêmes, dans la mesure ou au sein d'une seule et même actions, alternativement la mère et l'enfant accélère pour rattraper l'autre, et ceci jusqu'à se synchroniser.

Les résultats issus du codage ne permettent pas de se prononcer sur cette alternance. En effet celui des deux agents qui est à l'origine de l'interaction est difficilement iden-

Tête	Sourcils	Exp-faciale bouche	Bouche
relève	hausse	se met à sourire	entre-ouvre
relève beaucoup	hausse beaucoup	arrête de sourire	ouvre
rabaisse	rabaisse		ouvre en grand
			ouvre très grand

Tab. 2.2: Grille de codage des actions de la mère et de l'enfant susceptibles de révéler une *alternance phatique*

tifiable parce que les actions de l'un et l'autre sont souvent simultanées ou proches de l'être, si proche que la différence est en dessous du 25^{ème} de seconde et donc incodable sur un film à 25 images par seconde. Ainsi si l'on perçoit visiblement une alternance lors que l'on fait défiler image par image les vidéos, le codage n'est pas suffisamment fin pour en rendre compte. Notons que l'information nécessaire à l'interaction est entièrement contenue dans ces films dans la mesure où ce sont ces mêmes vidéos qui ont permis aux dyades mère-enfant d'interagir. Ainsi, faut-il faire la différence entre la compréhension du phénomène dynamique qu'est l'interaction et l'extraction des données nécessaires à chacun des agents pour interagir. Pour la compréhension du phénomène dynamique une vidéo à plus de 25 images par seconde pourrait s'avérer utile mais pour l'extraction des données nécessaires à l'interaction, elles sont déjà contenues dans la vidéo à 25 images par seconde.

Lors d'une interaction entre la mère et l'enfant, l'alternance typique observée est la suivante, la mère relève doucement la tête en entrouvrant la bouche, le bébé relève un peu la tête, la mère amplifie son mouvement en ouvrant plus franchement la bouche tout en souriant, le bébé sourit franchement, relève la tête et les sourcils, la mère et l'enfant se retrouve synchronisés à l'apogée du mouvement sourcils relevés, bouche ouverte, sourire et tête relevée (voir images 2, 3 et 4 de la figure 2.9), puis les deux reviennent vers une posture plus neutre et l'interaction continue, relancée (voir fig.2.9).

La manière dont apparaît l'alternance semble nettement liée à la vitesse d'exécution. Lorsque la mère et l'enfant se mettent à faire la même chose, ils accélèrent alternativement jusqu'à se retrouver synchronisés.



Fig. 2.9: Sur cette enchaînement de quatre photos de la double-vidéo, la mère relève la tête tandis que l'enfant la regarde (photo 1), sourit mais ne bouge pas, elle revient à une position plus neutre et là le bébé relève un peu la tête(photo 2) ce qui entraîne une réaction immédiate de la mère (photo 3) qui accompagne et amplifie le mouvement de son enfant jusqu'à une apogée (photo 4).

2.6.5 Détection de mouvement et humain

S'il est question d'accélération successive entre la mère et l'enfant puis de retour à la vitesse de départ et ainsi de suite, alors dans quelle mesure peut-on mesurer cette cinématique à partir des vidéos que nous avons et ce de manière objective comme utiliser de la détection de mouvement comme avec nos robots. Une telle étude permettrait de mesurer la généralisabilité à l'humain des résultats que nous avons obtenus avec les robots : les humains peuvent-ils se synchroniser à partir d'une fruste détection de mouvement ?

Nous avons utilisé le logiciel libre *Motion2D* de détection de mouvement. Ce logiciel est plus complet que la détection de mouvement que nous avons utilisée pour nos robots dans la mesure où il permet de définir une direction dominante, de la décomposer selon les abscisses et les ordonnées. Les résultats qu'il nous donne (sous la forme d'un vecteur de mouvement pour chaque image) s'apparentent à la figure 2.10 qui correspond au résultat obtenu avec l'une des dyades mère enfant de l'expérience de double-vidéo de la section 2.1.

Les résultats obtenus avec le logiciel *Motion2D* ne montrent pas de manière flagrante l'*alternance phatique* qui pourrait exister entre la mère et l'enfant. Dans le cas particulier de la figure 2.10 nous voyons par contre clairement le changement d'attitude de l'enfant lors du différé, qui y est beaucoup plus agité.

Pour tenter de tirer au maximum partie des résultats issus de la détection de mouvement, nous avons fait une analyse temps-fréquence de ce signal de détection de mouvement. La comparaison entre les fréquences de l'image de la mère et celles de l'image de l'enfant, sur les intervalles restreints aux phases d'imitation synchrone, ne fait ressortir aucune différence significative entre les conditions de direct et de différé, excepté pour un enfant où des fréquences de mouvements similaires ressortent pendant le direct tandis qu'elles ne ressortent pas pendant le différé. Cet enfant et sa mère utilisaient souvent pour interagir des mouvements de la tête tandis que d'autres dyades utilisent plus leurs mains, ou les grimaces et les expressions faciales, ce qui n'est pas détectable par une simple détection de mouvement.

Cette rapide expérience ne permet donc pas de conclure sur la possibilité d'un couplage entre mère-enfant uniquement basé sur une détection de l'activité motrice. En effet, si nous avons montré qu'une simple détection de mouvement ne suffit pas, plutôt qu'une détection du mouvement dominant faudrait-il une détection du mouvement global dans

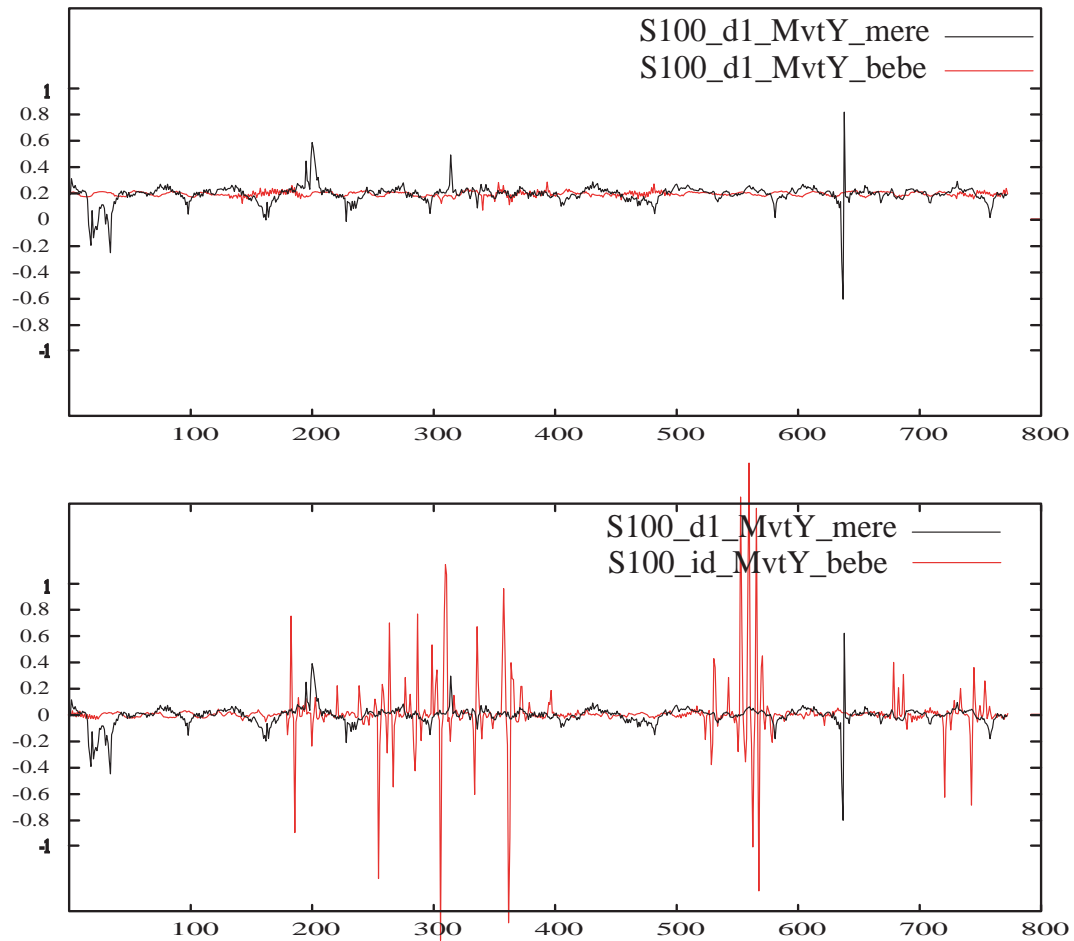


Fig. 2.10: Évolution du mouvement verticale d'une mère (en noir) et de son enfant (en rouge) lors d'interactions télévisée. La figure du haut montre la période d'interaction en direct, mère et enfant sont en opposition de phase bien que l'amplitude du mouvement de l'enfant soit plus faible que celle du mouvement de la mère. La figure du bas montre la période de différé, le mouvement de la mère est donc le même que dans la figure du haut, mais le mouvement de l'enfant est perturbé et l'opposition de phase disparaît rapidement.

l'image, ou une détection du visage associée à une détection de mouvement suffirait-elle, ou alors est-il nécessaire d'avoir par exemple une détection des expressions faciales de l'autre ?

2.7 *Autisme et couplage*

Les personnes exprimant un syndrome de type *autistique* ont, entre autres, une affection de leur capacité à interagir socialement. Malgré ce déficit, dans un contexte favorable à l'imitation réciproque où des objets sont présents en double exemplaire (comme pour les expériences de Nadel avec des dyades de jeunes enfants [Nadel, 1986]), et en suivant un protocole d'imitation, l'expérimentateur parvient à entrer dans un jeu d'imitations réciproques avec l'enfant avec autisme.

L'expérimentateur commence par imiter ce que fait l'enfant avec autisme à la suite de quoi l'enfant s'intéresse à l'expérimentateur et à ses actions en cherchant notamment à imiter l'expérimentateur en retour. S'ensuit la mise en place naturelle d'une communication par imitation entre l'expérimentateur et l'enfant avec autisme, qui se synchronisent l'un sur l'autre à tour de rôle, portent leur attention sur les actions de l'autre et sur l'objet qu'il manipule, à tour de rôle [Nadel and Butterworth, 1999, Nadel, 2002a, Nadel and Decety, 2002]. Ceci apparaît en dépit des déficits liés à l'autisme.

Du point de vue du couplage entre systèmes dynamiques, au sein de la dyade expérimentateur-enfant avec autisme, l'expérimentateur a en fait le rôle d'initiateur de l'interaction. Là où nous avons utilisé un oscillateur, dans chacun de nos robots, pour faire office d'«inclination à l'interaction» du robot, c'est l'expérimentateur qui doit amorcer cette inclination chez l'enfant avec autisme pour que celui-ci se mette tant à vouloir imiter qu'à vouloir être imité. L'expérimentateur, en prenant le deuxième exemplaire de l'objet que tient l'enfant et en imitant son action, se rend saillant dans l'environnement de l'enfant (du point de vue de l'enfant, l'expérimentateur est une perception en rapport avec ses propres actions) et fait que lui et l'enfant sont synchrones et couplés : l'attention est captée par l'action, l'action est le contexte commun, l'attention est conjointe sur ce contexte commun, finalement l'interaction est initiée.

2.8 Communication versus interaction

La frontière entre la simple *interaction*, qui est une influence réciproque, et la *communication* peut se trouver dans cette partie de la définition de Varela : «le modelage mutuel d'un monde commun au moyen d'une action conjuguée». Les partenaires de la *communication* se changent l'un l'autre en même temps qu'ils changent le monde qui les entoure. Il y a communication si il y a des périodes de synchronie. Ils ne s'échangent pas de l'information à proprement parler mais c'est le fait qu'ils s'influencent l'un et l'autre qui fait qu'ils communiquent.

La synchronie est ce qui permet aux agents de détecter, de leur point de vue égo-centré, l'existence d'un méta-système qui les implique, la communication. Comment la synchronie peut-elle en plus être le vecteur d'influence entre les agents ? Et sinon, pourquoi ne peut-elle pas l'être ?

Plutôt que de parler de transmission d'énergie, nous parlerons plutôt de quantité de changement introduite dans le système. Et finalement, en accord avec les résultats de psychologie du développement et notre définition de la communication, l'idée sous-jacente est que meilleure est la communication, plus les systèmes vont s'influencer l'un l'autre et se changer l'un l'autre.

La partie délicate du problème est justement cette co-existence entre couplage étroit entre les systèmes (une influence réciproque forte) et génération de nouveauté par la dyade (les systèmes se changent l'un et l'autre). Chacun doit s'adapter à l'autre mais chacun doit proposer de nouvelles dynamiques, le couplage doit donc être suffisamment léger pour laisser la place à cette nouveauté de manière à ce que chacun des systèmes puisse se démarquer de ce qu'il était avant de communiquer.

3. THÉORISONS ET GÉNÉRALISONS À PROPOS DE LA COMMUNICATION

Utilisation euristique de la formalisation

Nous avons vu que parmi les trois éléments clés de la *communication*, à savoir la *synchronie*, le *tour de parole* et le *partage d'attention*, la *synchronie* et le *tour de parole* sont étroitement liés voir indissociables : l'*émergence* d'un *tour de parole* entre deux agents est nécessairement associée à la mise en place d'une *synchronisation* de ces agents. Ces deux variables clés de l'interaction s'intègrent naturellement dans une description de la *communication* en tant que couplage entre systèmes dynamiques : la *synchronie* entre les systèmes est issue de la sensibilité des systèmes l'un à l'autre (le couplage), le *tour de parole* est issue du fait que chacun des agents peut exprimer un rythme (sans présumé sur la manière de le faire) qui soit perceptible par l'autre, chaque agent produit une dynamique.

Le fait de se focaliser sur un même objet est le troisième élément clé de l'interaction. Pour qu'un échange d'information puisse se mettre en place entre les partenaires, ils doivent créer à deux un «monde commun», établir un contexte d'interaction partagé. Si, pour deux agents, le fait d'être en *synchronie*, ou en tous cas de se retrouver de manière répétée en *synchronie*, et d'être alternativement actif et réceptif dans l'interaction, sont deux phénomènes susceptibles de «co-émerger» du couplage de deux systèmes qui sont chacun producteur de dynamiques et sensibles à l'autre, ce couplage fait-il émerger aussi un contexte commun aux deux interlocuteurs, un *objet* autour duquel l'interaction est construite et qui permet aux agents de *partager leur attention* via une référence commune ?

Par exemple, lorsque que l'*imitation* est utilisée pour sa potentialité de *communication*, l'*objet* focalisant l'attention des partenaires est tout trouvé, c'est l'action elle-même.

Lorsque deux systèmes sont couplés, qu'ils sont *synchrones* et prennent des *tours de rôle*, comme dans le cas de nos robots contrôlés par des oscillateurs, ce qui est partagé par les deux systèmes, c'est justement un rythme commun. En ce sens on peut dire qu'ils *s'imitent* l'un et l'autre. Cependant, l'«imitation» du rythme de l'autre est ici un phénomène émergent du couplage entre les deux agents, et donc est un des «produits» des capacités d'influence réciproque existant dans les architectures des agents.

Pour que l'*imitation* constitue en soi le vecteur d'influence réciproque entre les agents et non seulement un effet de bord de la synchronisation, elle doit mettre en jeu des actions : l'*objet* de l'*imitation* doit être constitué de gestes et de postures. C'est alors que la *communication* est la plus forte (à tel point que cette communication par l'imitation devient intrusive après 4 ans) : plus le contexte commun est large plus la communication est forte. C'est la différence entre le morse et la conversation de visu.

Pour qu'il y ait *imitation* réciproque, il faut être en mesure de comparer ses propres productions aux productions de l'autre. C'est ce qui est fait dans l'*attention conjointe*, il s'agit d'alterner sans cesse entre regarder soit même dans l'environnement et contrôler le regard de l'autre. Pour voir émerger un comportement telle que l'*attention conjointe* il est nécessaire de pouvoir se *synchroniser* et prendre des *tours de rôle* avec l'autre, mais il est en plus nécessaire de pouvoir établir des relations entre ses propres actions et les actions de l'autre.

Certains prétendent le faire en robotique [Hosoda et al., 2004] : ils proposent une architecture permettant de contrôler un robot humanoïde en le rendant capable d'*attention conjointe*, c'est-à-dire capable, lors d'une interaction avec un autre agent, d'alterner regard vers l'autre agent et regard vers l'objet regardé par l'autre agent de manière à contrôler en permanence la correspondance des deux et donc le partage d'attention envers l'objet.

Nous nous proposons d'étudier ce qu'ils proposent. Non-pas seulement d'étudier leurs résultats mais de reprendre leur architecture (architecture, robot et environnement compris) dans le détail et d'en faire une analyse théorique. Deux bénéfices majeurs sont à attendre d'une telle analyse : D'une part une compréhension des mécanismes impliqués dans les succès et défauts d'une architecture dédiée aux interactions homme-robot. D'autre part, se poser la question d'une bonne formalisation d'une architecture dédiée à l'interaction, c'est savoir pointer dans une architecture les éléments fondamentaux pour l'interaction.

Ainsi nous chercherons à répondre dans ce cas particulier, et à être capable de répondre dans le cas général, aux questions suivantes : Comment définir puis mesurer l'influence mutuelle entre les partenaires de l'interaction, influence caractéristique de la qualité de la communication ? L'architecture est-elle capable de participer à l'effort d'interaction ? Comment généraliser la part de succès de cette architecture à d'autres architectures et en éviter les écueils ? Dans quelle mesure le modèle mène à bien la tâche à laquelle il est destiné et en utilise-t-il ou non les mécanismes sous-jacents décrits par ses concepteurs ? Par exemple dans le cas de nos oscillateurs, le tour de rôle observé est-il bien directement modulé par le rythme de l'interaction ou par la réponse du second agent ? Si deux robots lèvent chacun le bras de façon rythmée et à tour de rôle, la simple observation ne permet pas de savoir si ce *tour de rôle* est uniquement dû au fait qu'un hasard bienheureux les a placés en opposition de phase ou s'il est dû à un ajustement du comportement de chacun des deux robots en fonction de l'évolution de l'interaction.

3.1 Le «Formalisme des Systèmes Cognitifs»

Des formalismes ont déjà vu le jour, certains décrivent les systèmes par le comportement [Ikegami, 1993, Steels, 1994], d'autres s'attachent à prendre en compte les interactions agent-environnement et en viennent à utiliser des concepts de la théorie des systèmes dynamiques [Kelso, 1995] mais leur complexité les limite à la résolution de problèmes simples ou au moins très spécifiques comme par exemple l'évitement d'obstacles [Smithers, 1995]. Ces études ont l'intérêt, par les choix dont elles procèdent, de mettre en avant des aspect particulier de la dynamique des systèmes cognitifs, mais ces choix ne leur permettent cependant pas de rendre compte de propriétés plus générales liant développement, comportement et environnement. Nous souhaitons développer un formalisme, c'est à dire un système de notation associé à des règles, qui focalise la modélisation de l'agent à la fois sur ses facultés d'apprentissage et sur ses capacités d'interaction avec l'environnement. L'idée est d'évacuer par la formalisation les éléments de l'architecture non directement impliqués dans ces fonctionnalités d'apprentissage et d'interaction.

«Les systèmes non-autonomes sont nettement plus difficiles à caractériser que les systèmes autonomes, y compris dans le cas où l'entrée a une structure particulièrement simple (par exemple périodique). Dans le cas non-autonome, la plupart des concepts tels que *bassin d'attraction*, *attracteur* etc, ne sont valides que sur des échelles de temps

courtes par rapport à l'échelle de temps de la variation du paramètre. Cependant, il est parfois possible de reconstituer une description qualitative du comportement d'un système non-autonome à partir de la description de ses dynamiques autonomes à entrée fixée et de la manière dont cette entrée varie au cours du temps» [Beer, 1995]. C'est ce que nous chercherons à faire avec le formalisme des systèmes cognitifs, «reconstituer une description qualitative ... au cours du temps»

Le *Formalisme des systèmes cognitifs (FSC)* introduit par [Gaussier, 2001] est destiné à s'appliquer dans un premier temps à l'étude des systèmes cognitifs tels que l'on peut les décrire avec des groupes de neurones formels. Les notations se doivent d'être explicites et simples pour permettre le passage aisé de «schémas de réseaux» à «écritures formelles» et inversement, d'écritures formelles à schémas. Les règles de ce formalisme sont principalement des règles de simplifications des systèmes, reprenant les conditions dans lesquelles ces simplifications sont possibles ainsi que la contrepartie qu'elles imposent [Gaussier et al., 2003, Gaussier et al., 2004].

Une étude utilisant le *FSC* consiste en trois étapes principales.

La première étape est celle de la formalisation, c'est à dire de la réécriture avec le *FSC*, de l'architecture plongée dans son environnement. Cette réécriture est en fait un travail d'appréhension de la complexité de l'architecture étudiée et de compréhension de ses possibilités d'interaction avec son environnement. Cette étape est nécessaire à la simplification de l'architecture et de son environnement et surtout à la focalisation sur leurs éléments pertinents pour le formalisme (voir figure 3.1).

La seconde étape consiste à caractériser les différentes dynamiques dans lesquelles peut se trouver le système architecture-environnement. Comme le fait remarquer Beer en 95 [Beer, 1995], pour étudier un système évoluant de manière complexe dans le temps, il est nécessaire de considérer ledit système en se limitant à des périodes courtes de stabilité. Dans [Gaussier et al., 2003, Gaussier et al., 2004], en effectuant l'étude d'un agent capable de produire des expressions faciales liées à son état émotionnel mais incapable de «reconnaître» ces expressions faciales produite par un autre, nous avons discriminé deux principaux types de périodes : la période avant apprentissage et la période après apprentissage, lorsque l'apprentissage a convergé et que l'environnement est «suffisamment» régulier pour qu'il soit stable. Lors de telles périodes l'architecture peut être simplifiée (soit en supprimant des éléments n'intervenant pas dans la boucle perception-action parce qu'ils sont vierges de tout apprentissage, soit en considérant comme équivalentes

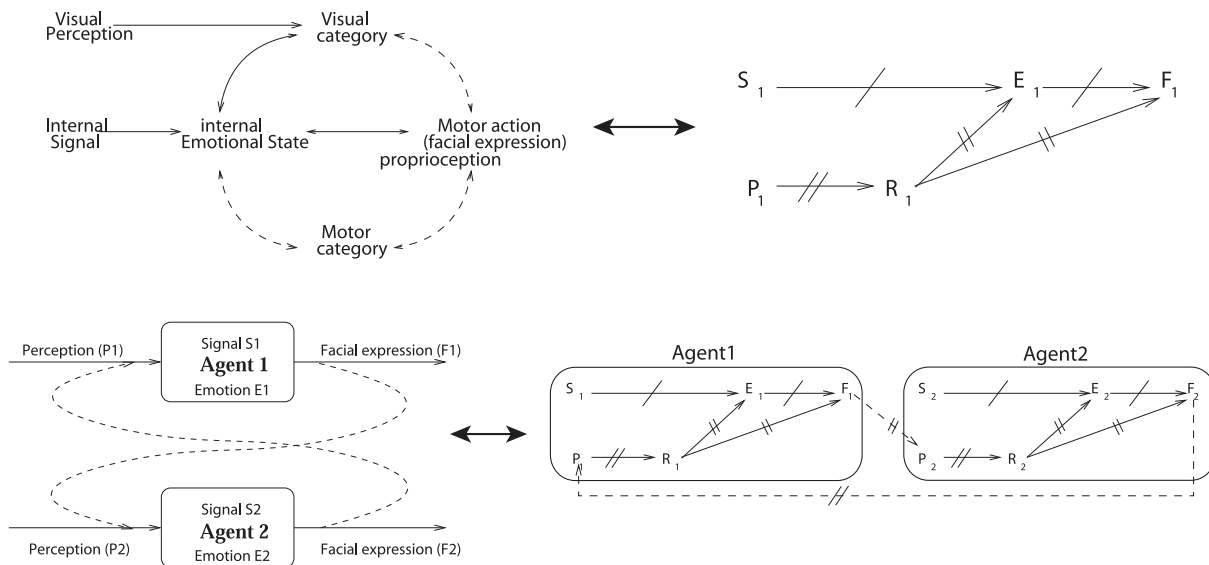


Fig. 3.1: Le FSC permet de passer de l'architecture originale (à gauche) à une schématisation mettant en avant les flux d'information au sein du système ainsi que les points où se jouent l'apprentissage et l'interaction avec l'environnement (à droite) [Gaussier et al., 2003]. Le schéma du haut montre la formalisation de l'architecture d'un agent. Le schéma du bas montre la formalisation de la mise en interaction de cette agent avec un autre agent similaire.

différentes voies comme par exemple les voies conditionnelle et inconditionnelle après un apprentissage de type conditionnement). De telles simplifications permettent de décrire les dynamiques de l'architecture et de son environnement, notamment dans le cadre d'interaction entre deux agents comme dans le schéma de la figure 3.2.

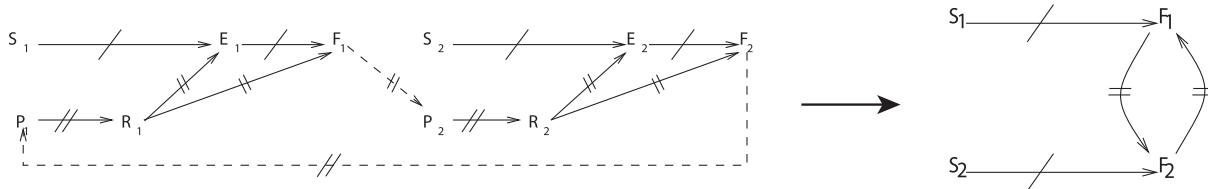


Fig. 3.2: Le FSC permet de simplifier un système architecture-environnement en considérant par exemple que l'apprentissage a convergé et donc que certaines voies peuvent être élaguées [Gaussier et al., 2003, Gaussier et al., 2004]. À l'issue de ces simplifications, les dynamiques du système architecture-environnement peuvent être décrites : elles dépendent de l'état stable choisi pour effectuer les simplifications.

La troisième étape consiste à tirer parti de la caractérisation des différentes dynamiques du système architecture-environnement en admettant que pour passer d'une phase stable à la suivante, comme par exemple pour passer de la période avant apprentissage à celle après apprentissage, lors de la période intermédiaire, les deux dynamiques doivent être compatibles. Cette nécessité de compatibilité fixe les conditions permettant la convergence de l'apprentissage. Sont ensuite déduites, les dynamiques permettant l'apprentissage (par exemple quel comportement doit avoir le second agent) ainsi que ce qui est appris (voir fig 3.3).

Les acquis de cette première étude d'une architecture simple et déjà dédiée à l'interaction doivent nous permettre d'aborder l'étude de l'architecture plus complexe de Hosoda et ses collègues dédiée à l'attention conjointe avec un partenaire humain. Les notations et les règles du formalisme sont détaillées dans l'article suivant, tout comme sont détaillées les raisons ayant poussé à leur choix.

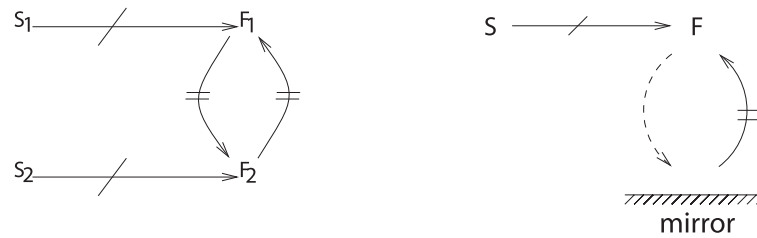


Fig. 3.3: Dans le cas que nous avons décrit dans [Gaussier et al., 2003, Gaussier et al., 2004], une condition permettant à l'apprentissage de converger est que le deuxième agent se comporte comme un miroir du premier. En postulant alors que c'est le cas, nous pouvons en déduire que le premier agent apprend des associations entre ses émotions et ses expressions faciales résultantes.

3.2 Article 4 : Formalisation d'une architecture dédiée à l'attention conjointe

Prepin, K., Gaussier, P., Revel, A., Nadel, J. (submitted) Cognitive System Formalism : Analysis of an Architecture for Human/Robot Interactions. *submitted in Connection Science Journal, Special Issue on Social Learning in Embodied Agents.*

Cognitive System Formalism: Analysis of an Architecture for Human/Robot Interactions

Ken Prepin* ** Philippe Gaussier* Arnaud Revel* Jacqueline Nadel**
prepin@ensea.fr gaussier@ensea.fr revel@ensea.fr jnadel@ext.jussieu.fr

* Neuro-cybernetic team, ETIS

UCP / ENSEA

95302 Pontoise, France

**Vulnerability, Adaptation, Psychopathology lab,

La Salpêtrière Hospital,

750013 Paris, France

Résumé

We have designed a Cognitive System Formalism (CSF) in order to simplify, analyze, compare and predict in a theoretical way the behaviors of autonomous and embodied *Cognitive Systems* (CS) involved in a dynamical loop with their environment. This formalism can apply when the environment contains other cognitive systems. The present paper aims to explain in details how the CSF can be used to compare existing architectures despite differences in implementation details. Through the analysis of the process by which Hosada et al. (2004)'s and Nagai et al. (2003)'s robot learns joint attention, the paper highlights general principles of human-robot interaction and addresses two fundamental issues for cognitive robotics : the possibility to enrich the interaction capacities of sociocognitive systems by formalizing and simplifying their architecture and the effect of learning through a temporal window on the dynamics of interaction. The paper focuses on joint attention process as a way to demonstrate the general efficiency of CSF for a large class of feed-forward learning architectures involving the interaction of two agents a propos a third party.

1 Introduction

Studies on robotic or human development have shown that many cognitive capabilities result from the agent/environment interaction and the emergent relations between perception and action [Berthoz, 1997, Gaussier and Zrehen, 1995, Maillard et al., 2005, Nadel et al., 2005, Pfeifer and Scheier, 1999]. Learning capabilities in autonomous and embodied cognitive systems induce an evolution and an adaptation of their internal dynamics. This capacity of "changing" along time is a key problem for the study of CS

(Cognitive System) insofar as the changes are to be taken into account as part of the dynamics. To this aim, we have designed a formal tool that allows to formalize the interaction between a given agent and the environment (including another agent). For instance, we have applied the CSF (Cognitive System Formalism) to build a theoretical model accounting for the capacity to express and recognize more and more complex emotional expressions throughout human infancy. We have shown [Gaussier et al., 2004] that the resulting architecture was able to learn the bidirectional association between an internal "emotion" and the corresponding facial expression. CSF allowed to demonstrate that learning the association was possible only if another agent acted as a mirror. This demonstration meets the hypothesis drawn from developmental data that mirroring acts as a social biofeedback [Gergely and Csibra, 2005, Nadel et al., 2005] : mirroring enables to learn something about oneself via the environment. We believe that the CSF approach can be directly applied to other problems of the same level of complexity. Consequently, the goal of the present paper is to test the CSF on an architecture that has not much in common with the architectures studied in our lab. Among different architectures and models of Joint Attention (JA) [Breazeal and Scassellati, 1999, Kozima et al., 2003, Nagai et al., 2003, Lau and Triesch, 2004, Morita et al., 2004, Nagai, 2005a, Sumioka et al., 2005], (see figure 1), we have chosen the JAL architecture, already implemented and tested [Nagai et al., 2003, Hosoda et al., 2004]. In [Nagai et al., 2003], joint attention is defined as *looking at the same object that someone else is looking at*, and in [Hosoda et al., 2004] it is defined as *a process to attend to the object that the other attends*.

To meet these definitions and their associated JAL architectures, we will consider joint attention as *the capacity to gaze at the same object than someone else via controlling her gaze direction*. Through learning, JAL architecture is supposed, as a cognitive system, to develop dynamics leading to gaze at the same object than the demonstrator. To do so, the robot has to learn associations between the positions of the objects and the direction of the demonstrator's gaze just by looking alternately at the objects on the table and at the demonstrator. In Nagai's experimental setup, the robot is sitting in front of a table that has three objects on. A demonstrator faces the robot. According to our CSF theoretical approach, the problem here is not to know *how this dynamics could work* but rather *how an architecture may evolve along time from dynamics that does not depend on JA at all toward a dynamics whose attraction basin is JA*.

Throughout the paper, we will have three goals : show that CSF enables to study a specific architecture dedicated to human/robot interactions ; replicate the experimental results of Hosada et al. and Nagai et al. in a theoretical way ; and enrich the original architecture so as to increase its interaction capabilities.

In section 2 (*Basic principles and rules of the formalism*) we will introduce the CSF and detail the different steps necessary to perform the formal analysis of an architecture : formal writing of the architecture, Constraints Enabling Learning (CEL), simplification rules, additional *constraints on the dynamics*, and learning capabilities. The primary principles and rules of CSF were described in previous papers. [Gaussier, 2001] defined elementary operations (addition, composition...) and applied these operations to simplify a set of equations describing a CS dedicated to "planning". In

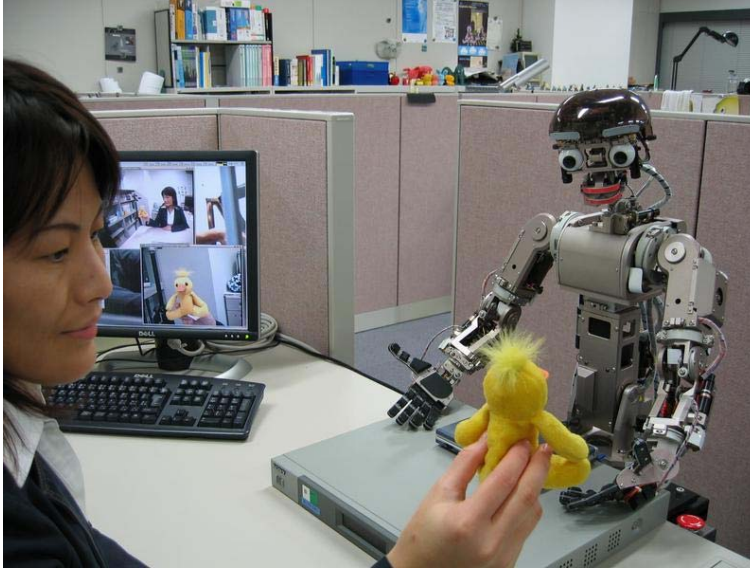


FIG. 1 – Yukie Nagai interacting with Infanoid. Joint Attention Learning based on Self-Other Motion Equivalence [Nagai, 2005b].

[Gaussier et al., 2003, Gaussier et al., 2004], two types of simplification rules were defined : a prior one independent from the relation between perception and action, and a second one applied afterwards and constrained by this relation in order to allow the convergence of learning. In section 3, the schematic architecture and the associated algorithms proposed in [Nagai et al., 2003, Hosoda et al., 2004] will be translated in our mathematical formalism. The equations obtained will represent both the flows of information, the decision making and the learning mechanisms used in the architecture fig 14. In section 4, we will analyze theoretically the JAL architecture. The architecture will be immersed in its environment. The equations will represent the whole interaction loop and will be simplified independently from any sensory-motor coupling. In section 5, we will determine the constraints enabling learning convergence. In section 6 these constraints associated to stable states of sensory-motor coupling will first be used to specify the dynamics of interaction between the JAL architecture and its environment (the objects and the demonstrator). Next, this specification will lead to propose changes in the JAL architecture such as ‘learning through a temporal window’. As a conclusion, we will discuss the efficiency of CSF to formalize different kinds of feed-forward architectures.

2 Basic principles and rules of the formalism

A CS (Cognitive System¹), for instance a JAL architecture, is supposed to be composed of several interconnected elements : some associated to input information (via specific “sensor” elements), some to output information (command of actions – via “actuators”) and other dedicated to intermediate processes. A CS interacts with its environment in a closed interaction loop. See, for instance figure 2 which shows a prototypical control architecture for a cognitive system.

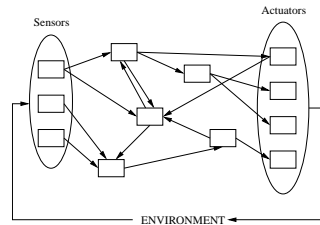


FIG. 2 – Prototypical architecture that can be manipulated by our formalism.

Our formalism aims both at representing and analyzing such a system. Practically, we have chosen to represent the input and output of a CS by vectors in the “bra-ket” notation². It is considered that any processing element of a CS takes an input vector $|x\rangle$ (column vector of size m with $|x\rangle \in R_+^m$) and filters it according to a matrix of weights W representing the functional links with the input group. The multiplication of the vector $|x\rangle$ by a matrix W is written $|y\rangle = W|x\rangle$ with $|y\rangle \in R_+^n$ for a matrix of size $n \times m$. Two main types of W matrices are distinguished according to their learning capabilities : *Unconditional* matrix U for reflex mechanisms (no learning) and *Adaptive* matrix A used for pattern matching processing, categorization... or all the other ways of filtering fulfilled by learning. Moreover, to take into account the fact that a processing element may be modified according to a non-linear function and a pattern of interactions between the elements of the same block, a non-linear operator k is introduced to characterize this processing. It can be either a simple processing, such as a scalar product or a distance measure, or a more complex operator such as an “If . . . then . . . else . . .” statement (hard decision making), a pattern of lateral interactions in the case of a competitive structure or a recurrent feedback (at short or long range). It is important to notice that k defines both the way to use the weights matrix in order to compute the output and the way to modify the matrix according to a given learning criteria. Figure 3 shows the schemas of two processing elements, a reflex and an adaptive

¹“*Cognitive systems*” will be understood here in the sense of [Mataruna and Varela, 1980] and more recently [Bourgine and Stewart, 2004] : Let *type A* interactions be interactions that have consequences for the internal state of the system and let *type B* interactions be interactions that have consequences for the state of the (proximal) environment or the relation of the system to its environment. Then, a *system is cognitive if and only if type A interactions serve to trigger type B interactions in a specific way, so as to satisfy a viability constraint.*

²The CSF should represent each part of an architecture as a specific “Perception-Action” coupling. At the origin of the formalism [Gaussier, 2001] shown that one way to characterize this coupling is to use wave functions evolving through time. [Maillard et al., 2005] still investigates this approach and we thus keep the inspiration from quantum mechanics and use “bra-ket” notation.

mechanism, and their associated writing with the formalism.

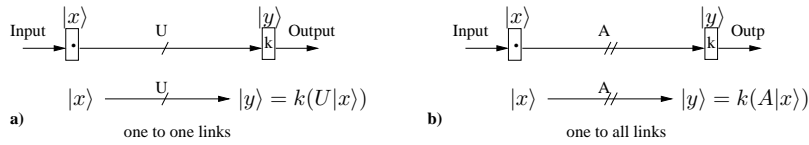


FIG. 3 – Writing of two basic processing units. The upper part of the figure is the graphical representation and the lower part of the figure is the formal notation. Arrows with one stroke represent “one to one” reflex connections and arrows with two parallel strokes represent “one to all” modifiable connections. a) *Unconditional* “one to one” connections (used as a reflex link) between two groups. b) *Adaptive* “one to all” connections (used as a categorization mechanism) between two groups. $|x\rangle$ and $|y\rangle$ are input and output vectors. U and A are the matrices of weights. k is the operator which controls both the way to combine the weight matrices with the input vector so as to obtain the output vector and the learning process. In fig.a), k is only a competition mechanism where as in fig.b), some self-organization mechanism must be taken into account for the learning process (a “kohonen map” for instance).

One of the purpose of our formalism is to transform a CS architecture in an equivalent architecture simpler to analyze and to understand. Thus we define, in a first approximation, the equivalence between two architectures ($Architecture1 \equiv Architecture2$) as follows : two architectures are equivalent if they have the same “behavioral attractors” [Beer, 1995, Gaussier et al., 2003, Revel and Nadel, 2004] for a given environment. In that perspective, a control architecture cannot be studied without taking into account the nature of the interactions with the environment and the dynamics which will enable the convergence of learning. Let $|x_1\rangle$ and $|x_2\rangle$ be two input vectors and $|y\rangle$ be an output vector. Let U and A be respectively unconditional and adaptive links. Let k be an operator which on one hand computes the vector $|y\rangle$ selecting the winning component of the vector $U|x_1\rangle + A|x_2\rangle$ and on the other hand processes the conditional learning of the link A depending on the output $|y\rangle$. Thus, the process to obtain the output $|y\rangle$ using the two inputs $|x_1\rangle$ and $|x_2\rangle$ is written $|y\rangle = k(U|x_1\rangle, A|x_2\rangle)$. Given this learning mechanism “ $k(U|x_1\rangle, A|x_2\rangle)$ ”, we define the *conditions enabling learning* (CEL) to be the conditions for learning convergence fixed by the classical studies of the learning mechanism. For instance, if the learning mechanism is a conditioning mechanism, some pairs of unconditional and conditional stimuli have to be presented more often than others, according to a particular probabilistic rule and be linearly separable. This set of constraints constitutes the CEL.

Let us consider a processing mechanism : in our example, either the unconditional pathway of a conditional learning mechanism, fig.4.a, or its conditional pathway after learning fig.4.b. The inputs of this processing mechanism can be split into two parts : the set of inputs that the mechanism is specifically designed to process, and the set of all the other inputs. The specific set should be correctly processed by the mechanism whereas there is no guarantee about a correct processing of the second set. Figure 4.a, illustrates the space of couples of conditional and unconditional inputs of an abstract example of a conditioning mechanism. We have designed the sets of correctly processed inputs, the set

of incorrectly processed inputs and the set of the ones for which some generalization properties of the considered mechanism can enable a correct processing. It is an ideal representation in which each subset is a compact region. Similarly, fig.4,b represents the set of inputs correctly processed by the adaptive pathway after learning (a conditional pathway in our example). Note that, if the processing mechanism is reduced to the unconditional pathway, the inputs that are correctly processed are defined by the design of the architecture, and a subset of unconditional inputs is correctly processed, independently from the conditional inputs fig.4,a. Conversely, if the processing mechanism is reduced to the adaptive pathway, the inputs that are correctly processed are defined through learning, and a subset of conditional inputs is correctly processed by the conditional pathway independently from the unconditional inputs fig.4,b.

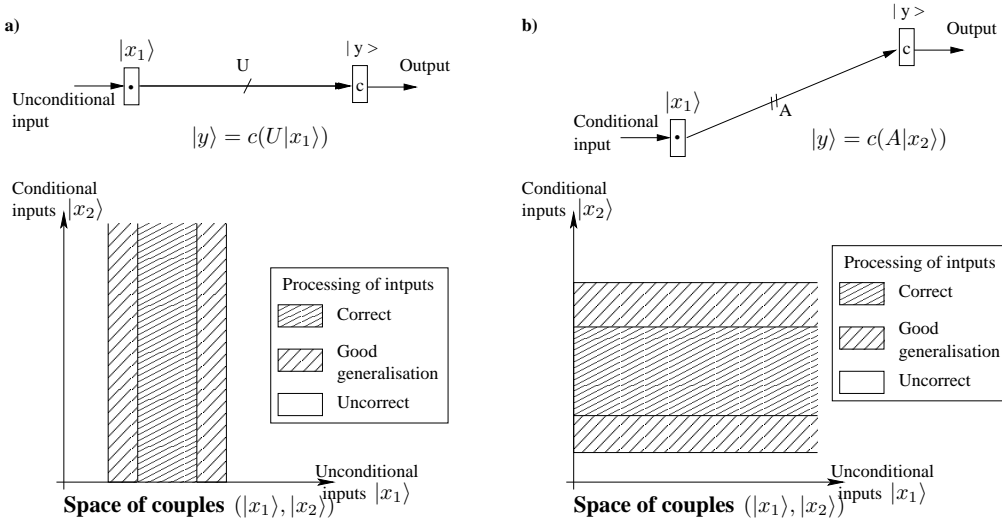


FIG. 4 – Given a fixed processing mechanism with a conditional (a) and an unconditional (b) input, the couples of inputs can be arranged in two sets : correctly vs incorrectly processed inputs (respectively tightly hatched vs white regions). In the set of incorrectly processed inputs, the inputs at the edges of the set of correctly processed inputs may be correctly processed thanks to generalization properties of the processing mechanism (hatched region). a) If the processing mechanism is an unconditional pathway, the correctly processed inputs are defined by the design of the architecture. A subset of unconditional input is correctly processed, independently from the conditional inputs. b) On the adaptive pathway, the correctly processed inputs are defined by the learning. A subset of conditional input can be correctly processed by the conditional pathway independently from the unconditional inputs.

Now, let consider the processing mechanism before and after learning. In our example, the processing mechanism is a conditioning mechanism (fig.5,a). The different sets of inputs that are correctly processed can be represented before and after learning, see fig.5,b vs fig.5,d. In this space of inputs (in our example, couples of conditional and unconditional inputs), we have represented the set determined by the CEL (fig.5,c) : for instance, this region must be included in the intersection between the sets of inputs correctly processed by each pathway. Even if the CEL bound a relatively small region which will enable

simplifications with the CSF, fig.5 shows that after learning the set of correctly processed couples of inputs should be much wider.

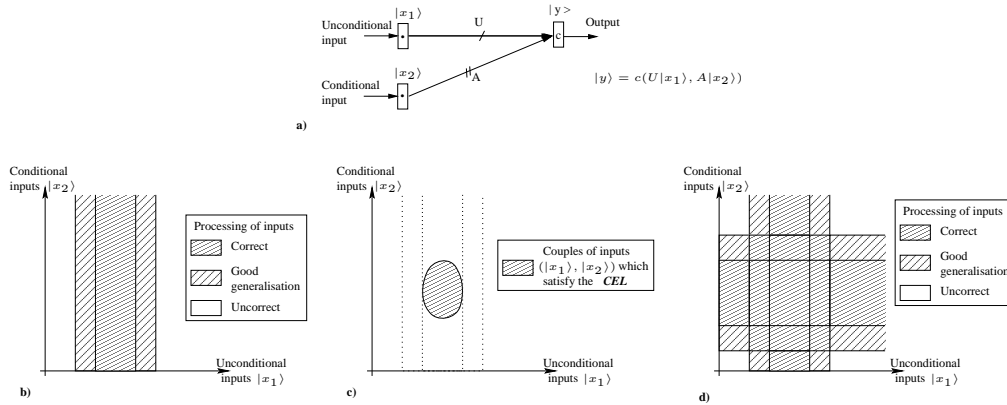


FIG. 5 – Given a processing mechanism (in our example the unconditional (a) and conditional (b) pathways of a prototypical conditioning mechanism), we have represented the ideal couples of conditional and unconditional inputs. These couples of inputs are arranged in two sets : correctly processed vs incorrectly processed inputs. In the set of incorrectly processed inputs, the inputs at the edges of the set of correctly processed inputs may be correctly processed thanks to generalization properties of the processing mechanism (hatched region). a) Before learning, a conditioning mechanism is equivalent to its unconditional pathway. The only inputs which can be correctly processed are those which are “unconditional” and to which the processing mechanism of the unconditional pathway was dedicated. b) Given a learning mechanism, the *conditions enabling learning* (CEL) determine the inputs which allow the convergence of learning. c) After learning, a generic conditioning mechanism is able to process either “conditional” inputs $|x_2\rangle$ or “unconditional” inputs $|x_1\rangle$, alone or together, and can extend learning to inputs out of the CEL.

The CSF is settled on these CEL and uses them to change a CS architecture into a simpler architecture, equivalent to the original one under the CEL. Hence the dynamical capabilities of the architecture can be determined and additional constraints for the convergence of learning can be fixed according to these dynamical capabilities. After learning the appropriate behavior under the CEL, the dynamics of interactions with the environment is reduced to an attraction basin (stable perception state [Gaussier et al., 2004]) which corresponds to a sensory-motor invariant, corresponding to the embodiment and the constraints of the environment. Hence, two phases or states can be distinguished : a *before learning* state in which only the unconditional pathway of the architecture is efficient and an *after learning* state in which the adaptive processing mechanism should have converged in a stable processing state (see fig.6).

According to the *before learning* and *after learning* states, we differentiate two types of simplifications [Gaussier et al., 2003]. Simplifications of the first type can be performed at any time, before or after learning, and under any conditions (no learning constraints), because the system keeps its learning properties unchanged. Those are very limited simplification rules which only allow to reduce the number

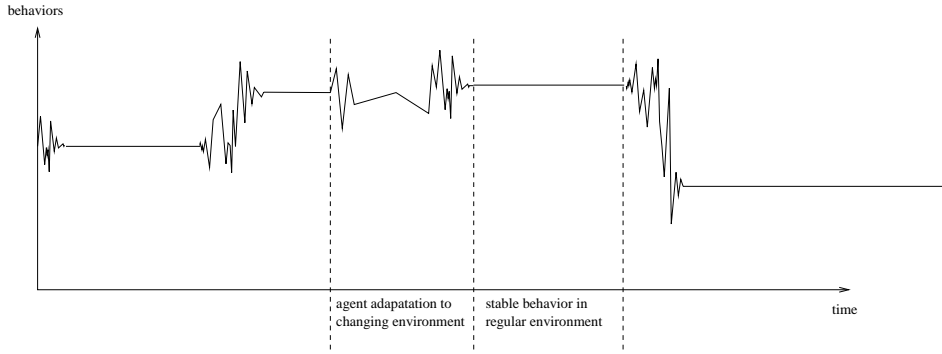


FIG. 6 – Intuitive representation of a “stable” behavior allowing the formal simplifications of a system.

of elements in the architecture and suppress trivial redundancies (i.e. simplification of a chain of reflex links). For instance a chain of two competitive groups connected by unconditional links can be written $c_1(U_1|c_2(U_2|x))$ and is equivalent to $c_1(U'|x)$ (see fig. 7. a). In the same way, when adaptive mechanisms are connected in parallel, they can be written $c(A_1|x, A_2|x)$ and are equivalent to $c(A_3|x)$ (see figure 7. b).

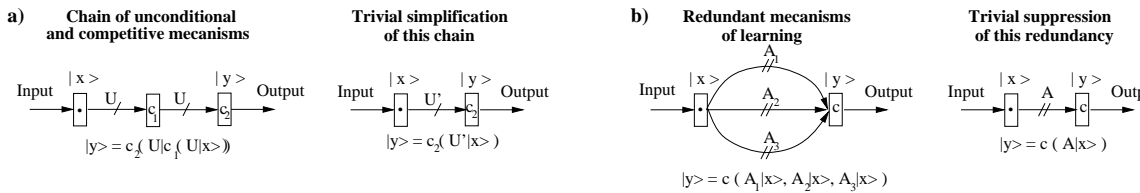


FIG. 7 – Trivial simplifications which can be performed at any time : they do not modify learning capabilities and dynamics of the architecture. a) simplification of a series of *Unconditional* links and competitive mechanisms : $c_2(U|c_1(U|x)) \equiv c_2(U'|x)$. b) simplification of a set of parallel *Adaptive* links between two boxes : $c(A_1|x, A_2|x, A_3|x) \equiv c(A_3|x)$.

Simplifications of the second type, *after learning* simplifications, are more ambitious simplifications which may imply changes in the architecture dynamics. They are much more useful to study the dynamics of a system since they point out additional constraints on the learning convergence. To be valid, such simplifications should be performed considering that the system is in a stable state of perception or interaction with its environment : the system must remain almost unchanged, the environment must be regular enough to avoid internal modifications of the robot’s dynamics and the robot’s behavior must be regular and predictable too. The simplifications are only valid during this *stable periods*. The learning must have converged and the environmental conditions must be restricted according to the CEL. These *after learning* simplifications focus on the dynamics of the system which have been acquired during learning. They enable to study independently different parts of the architecture and their interactions with the environment. They allow to define additional constraints for the functioning of the original

architecture (fig.8). Let us consider the space \mathcal{S} of every possible dynamics of any architecture in an environment restricted to the CEL. The possible dynamics of the studied architecture under the CEL constitute a subspace \mathcal{S}' of \mathcal{S} . The CSF aims to determine this subspace \mathcal{S}' . Determining \mathcal{S}' is hard to perform while studying the architecture as a whole, but determining \mathcal{S}' becomes much easier studying the different simplified architectures obtained using *after learning* simplifications rules. For instance, if the architecture is a prototypical conditioning mechanism, it will be simplified in two architectures (equivalent under the CEL) : one with only the reflex pathway and the other with only the conditional pathway. These simplified architectures allow to determine the subspaces \mathcal{S}_i associated to their functioning dynamics. When they are put back together, the global functioning dynamics is reduced to the intersection of the subspaces \mathcal{S}_i : $\mathcal{S}' = \cap \mathcal{S}_i$. Figure 8 gives an intuitive representation of the possible dynamics of the architecture under the CEL. A prototypical conditioning mechanism is embedded in an environment restricted to the CEL. Under these CEL and *after learning*, the conditioning mechanism is both equivalent to its reflex pathway and to its conditional pathway. As described just above, each one of the two equivalent architectures enables determining a subspace \mathcal{S}_i of \mathcal{S} , and the intersection of these two subspace is \mathcal{S}' , which add to the CEL constraints on the possible dynamics of the whole architecture under the CEL : we define these additional constraints as the *constraints on the dynamics* for the learning convergence.

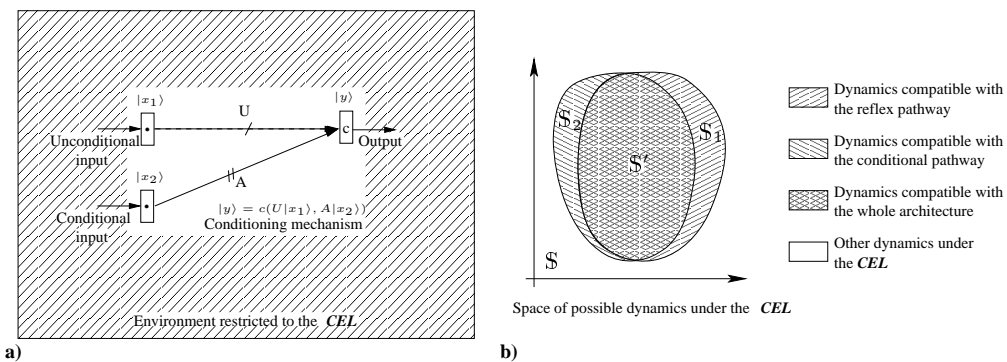


FIG. 8 – Boundary of the *constraints on the dynamics* for the convergence of learning. In a), the architecture is a prototypical conditioning mechanism embedded in the environment restricted to the CEL. b) represents, in an ideal way, the space of all the possible dynamics under the CEL, \mathcal{S} . Under the CEL, the conditioning mechanism is equivalent either to its reflex pathway or to its conditional pathway. Each simplified architecture determines a subspace of dynamics which enables interactions between the simplified architecture and the environment, for instance \mathcal{S}_1 for the reflex pathway and \mathcal{S}_2 for the conditional pathway. The intersection of these two subspaces is the subspace of dynamics \mathcal{S}' which enables the interaction of the whole architecture with the environment.

CSF allows to study the different capabilities of an architecture and among others, what are the benefits of learning in terms of dynamics and behavioral attractors. We have seen how to use the CEL so as to fix additional *constraints on the dynamics* for learning convergence. Let us consider that learning

has converged. During the learning phase, the *constraints on the dynamics* were necessarily satisfied, and thus, under the CEL, the behavioral attractors after learning are the same as the one fixed by the *constraints on the dynamics*. Thus we are able to generalize these dynamics to an environment not restricted to the CEL. Regarding a specific environment, or a task to learn (such as JA in our case), we can determine which are the abilities acquired by learning. We alternately use these two points of view (environment restricted to the CEL and full environment but after learning convergence) to find first the condition for a good learning (*constraints on the dynamics* added to the CEL) and next the solutions obtained after learning.

3 Formalization of the architecture for joint attention

In order to study its dynamics we need to write the JAL architecture (fig. 9), in a formal way. Next, we will be able to deduce the general schema and the equation representing the whole system (the human/robot interaction).

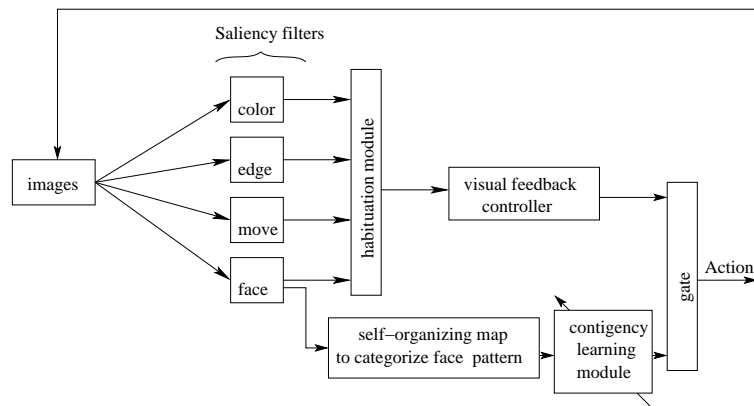


FIG. 9 – Reproduction of the JAL architecture which will be studied (derived from [Hosoda et al., 2004]). The arrows show the pathway of the signal through the different modules.

Practically, it is easier to start the formalization analyzing the output of the robot. Let us suppose the action of the robot is written as an output vector $|act\rangle$. This output is generated by the *gate* which processes a competition, noted c_1 , between two signals. On one hand, the output vector $|h\rangle$ of the *habituation module* is processed by the *visual feedback controller* (fig.10,a). According to [Hosoda et al., 2004], this controller performs an unconditional treatment to obtain the action and is thus written as an unconditional matrix U_{act} . As a result, the first competitive signal is $U_{act}|h\rangle$. On the other hand the vector of *face recognition* $|fr\rangle$ is processed by the *contingency learning module* (fig. 10a). By construction this module learns to associate facial patterns $|fr\rangle$ with $U_{act}|h\rangle$ (the other signal in competition). In fact, it performs a conditional treatment learned by contingency and it is thus written as an adaptive matrix of contingency A_{cont} . The second competitive signal is $A_{cont}|fr\rangle$.

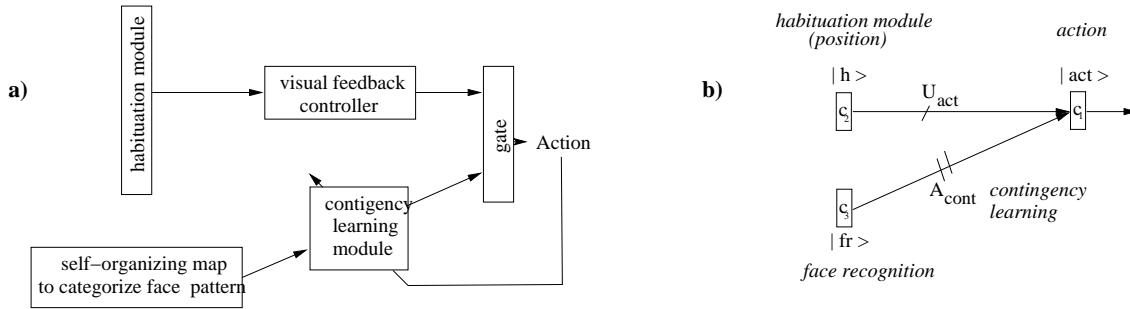


FIG. 10 – The *visual feedback controller* is an unconditional process and the *contingency learning module* is a conditional learning. Hence, the U_{act} matrix describes the reflex pathway and the adaptive matrix of contingency A_{cont} describes the conditional processing of the signal. At each step of the signal processing, the signals are written as vectors : $|h\rangle$, $|fr\rangle$ and $|act\rangle$. a) original writing of the architecture. b) formalization with the CSF.

We can now draw the schema fig.10,b and write the following equation 1 which describes the action $|act\rangle$ depending on both the habituation output $|h\rangle$ and the face recognition $|fr\rangle$:

$$|act\rangle = c_1 (U_{act}|h\rangle, A_{cont}|fr\rangle) \tag{1}$$

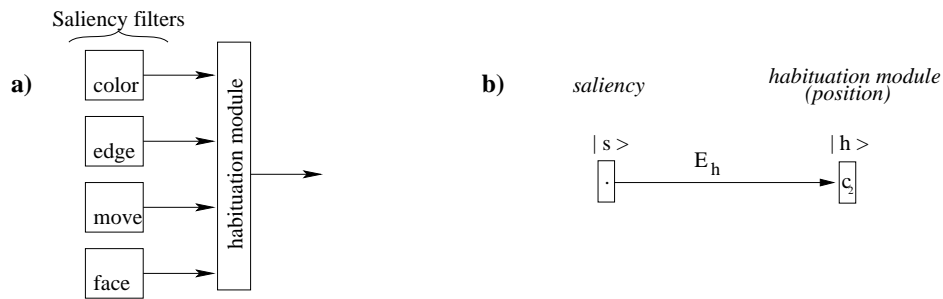


FIG. 11 – The four saliency filters outputs can be written as one vector of saliency $|s\rangle$ (section 8.1). The *habituation module* is an evolving (beforehand defined evolution) mechanism E_h which makes a choice of action $|h\rangle$ depending both on its input $|s\rangle$ and on its own previous state. a) original writing of the architecture. b) formalization with the CSF.

The next step will be to formalize the processing elements situated before both the habituation output $|h\rangle$ and the face recognition $|fr\rangle$. Let consider the saliency filters which precede $|h\rangle$. The first rule of *Decomposition of a signal* of the CSF (see Appendix 8.1) shows that the different outputs of the filters can be written as a single vector of saliency $|s\rangle$ which concatenates the four filters. The *habituation module* generates an output $|h\rangle$ depending both on the *saliency filters* output $|s\rangle$ and on the preceding state of the *habituation module* itself (fig.11,a). It is neither an unconditional process (since the *habituation* changes through time) nor a learning process (since it follows a beforehand defined schema). We formalize this process by the product of the incoming signal $|s\rangle$ with an evolving matrix of

habituation E_h . The evolution of the matrix E_h only depends on changes and novelty in the environment. At last, a competition mechanism c_2 makes the final decision $|h\rangle$. We thus have the equation 2 associated with fig.11,b :

$$|h\rangle = c_2(E_h|s) \quad (2)$$

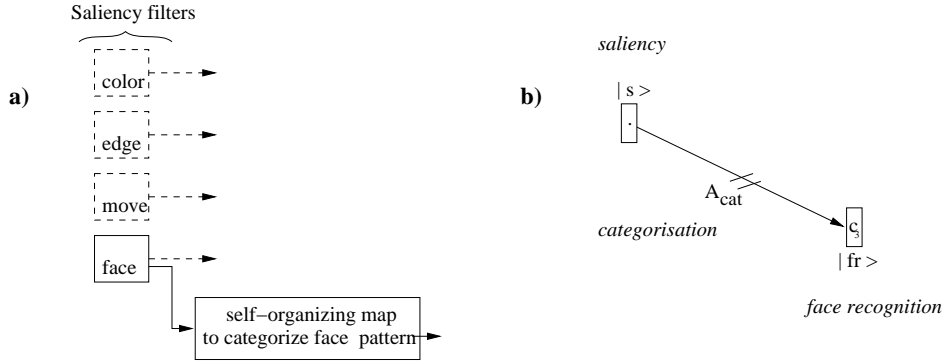


FIG. 12 – a) original writing of the saliency filters and face categorization. b) formalization with the CSF. The *self-organizing map* is a learning mechanism of categorization (learned matrix A_{cat}). The activity of the face recognition $|fr\rangle$ corresponds to the recognition of a face pattern $|f\rangle$. The face pattern $|f\rangle$ is one of the four outputs of the *saliency filters* part of $|s\rangle$. We show in the Appendix 8.1 that the process of A_{cat} on $|f\rangle$ is the same as the process of A_{cat} on $|s\rangle$.

The element preceding face recognition $|fr\rangle$ is a *self-organizing map* which classifies face patterns $|f\rangle$ in a topological way depending on their reciprocal similarities (fig.12,a). It is a self-organized recognition mechanism which chooses a winner $|fr\rangle$ between different categories and reinforces the association between the stimulus and the chosen response. We will write it as an adaptive matrix for categorization A_{cat} applied to the face pattern vector $|f\rangle$ and followed by a competition mechanism c_3 : $|fr\rangle = c_3(A_{cat}|f)$.

The face pattern $|f\rangle$ is one of the four outputs of the *saliency filters*. As shown for the *habituation module*, these four signals can be written as a single signal of saliency $|s\rangle$. Appendix 8.1 (second rule of *Decomposition of signal*) shows that we can consider the process of A_{cat} on $|f\rangle$ as being the same as the process of A'_{cat} on $|s\rangle$ (implying changes without consequence on A_{cat}). We thus have the equation 3 associated to fig.12,b :

$$|fr\rangle = c_3(A_{cat}|f) = c_3(A'_{cat}|s) \quad (3)$$

For simplicity and since it does not involve any risky changes, we will write A_{cat} for A'_{cat} . Now, only the last part of the architecture remains to be formalized.

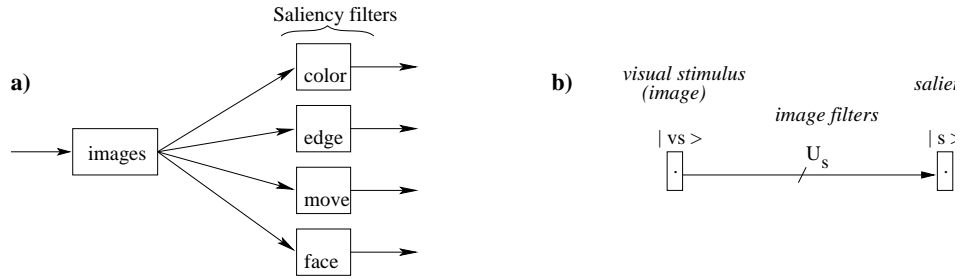


FIG. 13 – The *saliency filters* are four *Unconditional* filters $U_{s,i}$ ($i \in [1, 4]$) which extract from input images four vectors $|s_i\rangle$ corresponding to four salient properties of the visual stimuli. We show in Appendix 8.1 that this four processes can be written as a single process U_s giving a single output vector of saliency properties $|s\rangle$. a) original writing of the architecture. b) formalization with the CSF.

The *saliency filters* extract relevant properties (color, edges, move and face) from the visual stimulus $|vs\rangle$ (left schema of fig.13). Each filter processes an unconditional linear treatment $U_{s,i}$ ($i \in [1, 4]$) to obtain a salient feature $|s_i\rangle$. We show in Appendix 8.1 that we can replace the matrices U_i by a single unconditional matrix U and the $|s_i\rangle$ by a single signal of saliency $|s\rangle$ (see third rule of *Decomposition of signal*). We obtain the equation 4 associated with fig. 13 schema :

$$|s\rangle = U|vs\rangle \quad (4)$$

Now, we have formalized each part of the original architecture. We can deduce the equation representing the whole architecture starting from the action vector $|act\rangle$. We replace the habituation output $|h\rangle$ and the face recognition $|fr\rangle$ in the equation 1 using equations 2 and 3 :

$$\begin{aligned} |act\rangle &= c_1(U_{act}|h\rangle, A_{cont}|fr\rangle) \\ &= c_1(U_{act}|c_2(E_h|s)\rangle, A_{cont}|c_3(A_{cat}|s)\rangle) \end{aligned} \quad (5)$$

We end by replacing the saliency vector $|s\rangle$ in equation 5 using equation 4 :

$$|act\rangle = c_1(U_{act}|c_2(E_h|U|vs)\rangle, A_{cont}|c_3(A_{cat}|U|vs)\rangle) \quad (6)$$

We can here notice that our formalism has allowed to obtain a very compact representation of the whole initial JAL architecture, from the visual stimuli to the head movement control, by a single equation (equation 6).

The associated fig.14 schema represents the whole architecture, giving an overview of every of its flows of information and of the way they are processed.

The embodied JAL architecture extracts two independent signals from the visual stimuli $|vs\rangle$: objects features and face pattern. We assume that the visual stimulus $|vs\rangle$ can be written as two independent

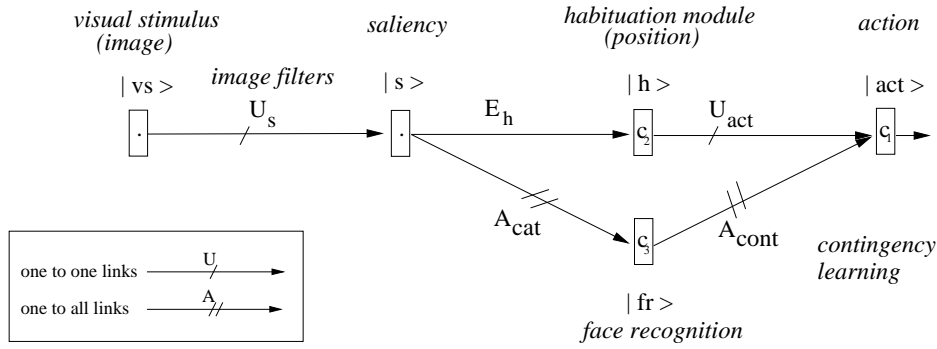


FIG. 14 – Schema of the whole architecture. The symbols on the different arrows represent the different matrices and operators characterizing the processing of the signal. The vectors, which represent the signal at different points of the architecture, are written on the top or on the bottom of the different operator boxes (the letters inside the boxes represent the operators characterizing the combination of the signals and the matrices, and the learning).

stimuli : the objects on the table and the face pattern of the human interacting with the robot. The visual stimulus can be thus written $|vs\rangle = |obj\rangle + |face\rangle$ with $|obj\rangle$ the vector representing the objects (including the other agent face) and with $|face\rangle$ the vector coding for the face and its gaze direction. The consequence of such a decision is that we assume the independence of the two pathways, *Adaptive* and *Unconditional* (see fig.15).

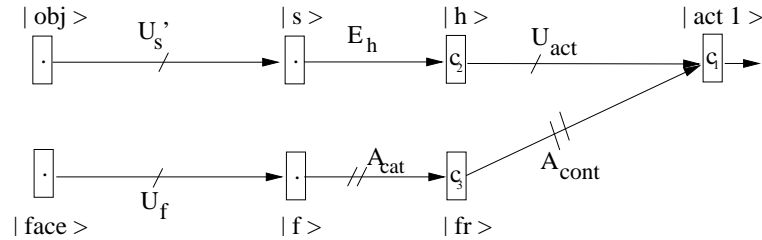


FIG. 15 – The JAL architecture is rewritten with two pathways processing independently objects and face features. ($|obj\rangle$ is the vector describing objects, U'_s is the unconditional saliency matrix, h is for habituation, f is for face, A_{cat} is for the adaptive categorization matrix, fr is for face recognition, $cont$ is for contingency and act is for action).

Thus, the equation 5 can also be rewritten as the equation 7 where action $|act1\rangle$ is expressed according to the objects salient features $|s\rangle$ and the face pattern $|f\rangle$. $|s\rangle$ and $|f\rangle$ are extracted from the environment : the objects (including the human face) $|obj\rangle$ and the face $|face\rangle$ by unconditional matrices U'_s and U_f respectively.

$$|act1\rangle = c_1(U_{act}|c_2(E_h|s)\rangle, A_{cont}|c_3(A_{cat}|f)\rangle)$$

$$= c_1(U_{act}|c_2(E_h \cdot U'_s|obj\rangle)), A_{cont}|c_3(A_{cat} \cdot U_f|face_2\rangle)) \quad (7)$$

The formalization of the architecture is almost complete but one crucial point remains. In any architecture, two distant points on the same information flow are separated by a certain amount of computation (processes) : For instance $|obj\rangle$ and $|act1\rangle$ are both on the *Unconditional* pathway and are separated by the *saliency filters* and the *habituation module*. This amount of processes takes a certain time of processing. In the present architecture, the *temporal distance* separating the action from the stimulus can be defined according to either the *Unconditional* pathway or the *Adaptive* pathway. The building of the architecture (software choices of synchronous architecture), which computes an action using either the *habituation module* decision or the *face recognition* pathway, implies that the *temporal distance* between $|obj\rangle$ and $|act1\rangle$ on one hand and between $|face_2\rangle$ and $|act1\rangle$ on the other hand, be the same. This *temporal distance* will be noted Δt_1 .

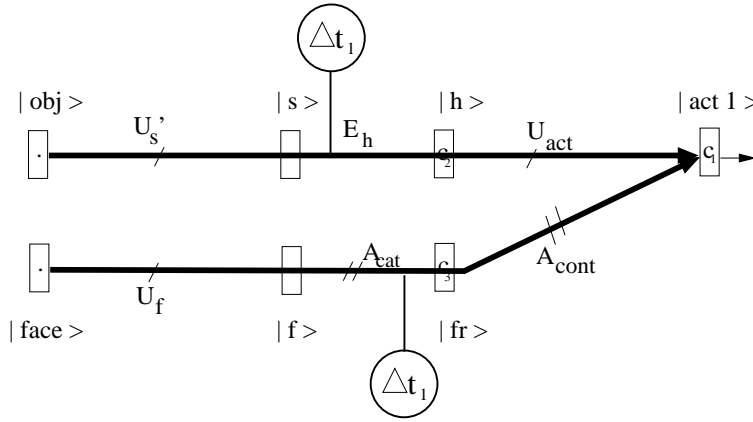


FIG. 16 – Architecture written with *temporal distances* between action and stimulus. The architecture design constraints both pathways (*Unconditional* and *Adaptive*) to be synchronized. A single *temporal distance* Δt_1 is defined.

The action, $|act1(t)\rangle$, at time “ t ” depends on the stimuli, $|obj(t - \Delta t_1)\rangle$ and $|face_2(t - \Delta t_1)\rangle$ at time “ $t - \Delta t_1$ ”. Adding this formalization of time, the equation 7 should be written as follows :

$$|act1(t)\rangle = c_1(U_{act}|c_2(E_h \cdot U'_s|obj(t - \Delta t_1)\rangle)), A_{cont}|c_3(A_{cat} \cdot U_f|face_2(t - \Delta t_1)\rangle)) \quad (8)$$

This equation describes formally both the complete architecture and its internal dynamics. Now, in order to study the architecture capabilities, the interaction with the environment (including the social environment) should also be formalized so as to obtain a global set of equations which will represent the potential dynamics of the system formed by the agent and its environment.

4 The formalized agent immersed in its environment

To study the capabilities of a robot using the JAL architecture, we will formally immerse it in an environment corresponding to the original experimental setup. Indeed, we have rewritten the JAL architecture as a classical input/output system, ignoring the dynamical interactions as in the classical AI paradigm. The external links relating the outputs to the inputs have to be formalized so as to close the *Sensory-Motor* loop. An *Agent2* which displays face patterns and interacts with the robot (*Agent1*) is introduced in the *Sensory-Motor* loop. In the JAL experimental setup, *Agent2* is a human experimenter. S/he acts according to information about objects and according to the gaze direction of the robot. Similarly, the robot acts via processing informations coming from the position of the objects and the face pattern of the demonstrator. At this point, it is interesting to notice that the unique association and learning point between the independent pathways is the output of the competition mechanism c_1 . The operator c_1 controls the A_{cont} 's learning of contingencies between the two pathways. Thus, to enable convergence of learning, the two signals converging to c_1 must be correlated. Inside the architecture, these two signals are totally independent because of the independence of the *Unconditional* and the *Adaptive* pathways. Hence, the two signals must be correlated outside the architecture, i.e. in the objects/human environment. The vector $|face\rangle$ represents *Agent2*'s face pattern. In the studied experimental setup, it characterizes *Agent2*'s gaze direction. Considering that the vector $|face\rangle$ depends on *Agent2*, the correlations between the $|obj\rangle$ and $|face\rangle$ incoming vectors depend on *Agent2*'s behavior. For instance, if *Agent2* gazes at one of the objects, he demonstrates a face pattern $|face\rangle$ correlated with the object's location $|obj\rangle$. An operator ξ is introduced to characterize how *Agent2* links *Agent1*'s gaze direction and the objects' location through its own gaze direction. Finally, the interaction between the two agents is represented by the global architecture of figure 17.

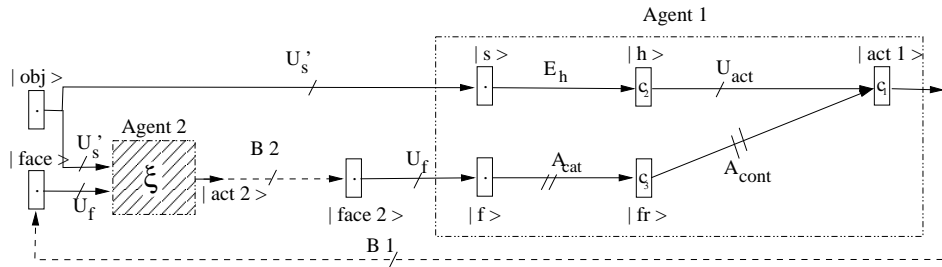


FIG. 17 – *Agent2*'s behavior depends on both objects and *Agent1* (the robot) behavior, through the operator ξ . $|face_i\rangle = B_i|act_i\rangle$ and the matrix B_i represents the effect of the gaze direction (action) on the image of the face.

At a given time t , the outputs of the human caregiver, *Agent2*, depend on the stimuli occurring at $t - \Delta t_2$: $|obj(t - \Delta t_2)\rangle$ and $|act_i(t - \Delta t_2)\rangle$. Δt_2 represents the processing time of *Agent2* (from its inputs to its outputs see fig. 18).

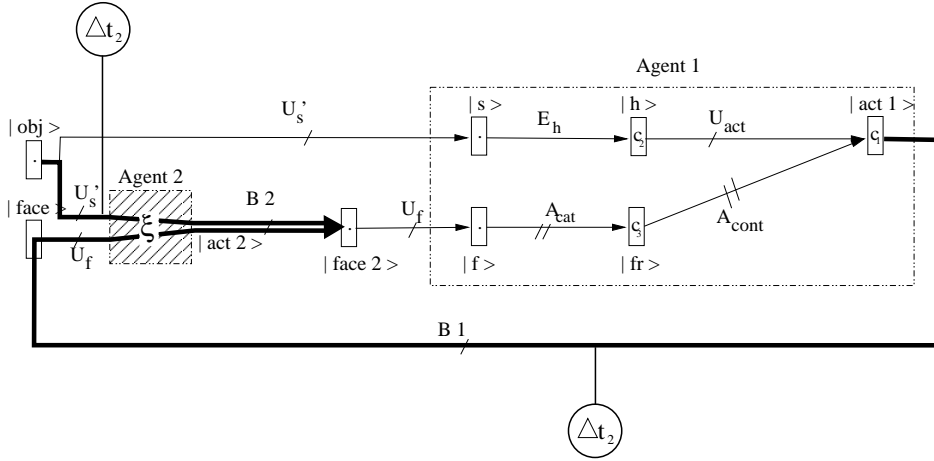


FIG. 18 – The JAL architecture written with two pathways processing independently objects and face features. $|obj\rangle$ is the vector describing objects, U'_s is the unconditional saliency matrix, in the same way $|h\rangle$ is for habituation, $|f\rangle$ is for face, A_{cat} is for the adaptive categorization matrix of facial information, $|fr\rangle$ is for face recognition, A_{cont} is the matrix used for contingency learning, $|act\rangle$ is for action.

Hence, the outputs of ξ at time t , $|act2(t)\rangle$, are written as follows in equation 9 :

$$|act2(t)\rangle = \xi(|obj(t - \Delta t_2)\rangle, |act(t - \Delta t_2)\rangle) \quad (9)$$

and for $t - \Delta t_1$ we have $|act2(t - \Delta t_1)\rangle = \xi(|obj(t - \Delta t_1 - \Delta t_2)\rangle, |act(t - \Delta t_1 - \Delta t_2)\rangle)$ Defining $\Delta t_3 = \Delta t_1 + \Delta t_2$ (duration of a complete interaction loop), the equation becomes equation10 :

$$|act2(t - \Delta t_1)\rangle = \xi(|obj(t - \Delta t_3)\rangle, |act(t - \Delta t_3)\rangle) \quad (10)$$

The equation 8 which represents the output gaze control of the robot (*Agent1*) must be slightly modified to take into account the human caregiver's behavior ξ (*Agent2*) :

$$\begin{aligned} |act1(t)\rangle &= c_1(U_{act}|c_2(E_h \cdot U'_s|obj(t - \Delta t_1)\rangle), A_{cont}|c_3(A_{cat} \cdot U_f|face_2(t - \Delta t_1)\rangle)) \\ &= c_1(U_{act}|c_2(E_h \cdot U'_s|obj(t - \Delta t_1)\rangle), A_{cont}|c_3(A_{cat} \cdot U_f|B_2|act2(t - \Delta t_1)\rangle)) \\ &= c_1(U_{act}|c_2(E_h \cdot U'_s|obj(t - \Delta t_1)\rangle), \\ &\quad A_{cont}|c_3(A_{cat} \cdot U_f|B_2|\xi(U_f|act1(t - \Delta t_3)\rangle, U'_s|obj(t - \Delta t_3)\rangle))) \end{aligned} \quad (11)$$

Considering that if the input of the operator ξ can be written as the product of an *unconditional matrix* U by a vector $|v\rangle$ then $\xi(U|v\rangle) = \xi'(|v\rangle)$ where ξ' is the compound function $\xi \circ U$ and thus have the same learning and dynamic properties as ξ , $\xi(U_f|act1), U'_s|obj\rangle$ will be written $\xi'(|act1\rangle, |obj\rangle)$. We also have the matrices product $A_{cat} \cdot U_f$ which can be written A'_{cat} . Equation 11 becomes equation 12 (see Appendix 8.2) :

$$|act1(t)\rangle = c_1(U_{act}|c_2(E_h \cdot U'_s|obj(t - \Delta t_1)\rangle), A_{cont}|c_3(A'_{cat} \cdot \xi'(|act1(t - \Delta t_3)\rangle, |obj(t - \Delta t_3)\rangle))) \quad (12)$$

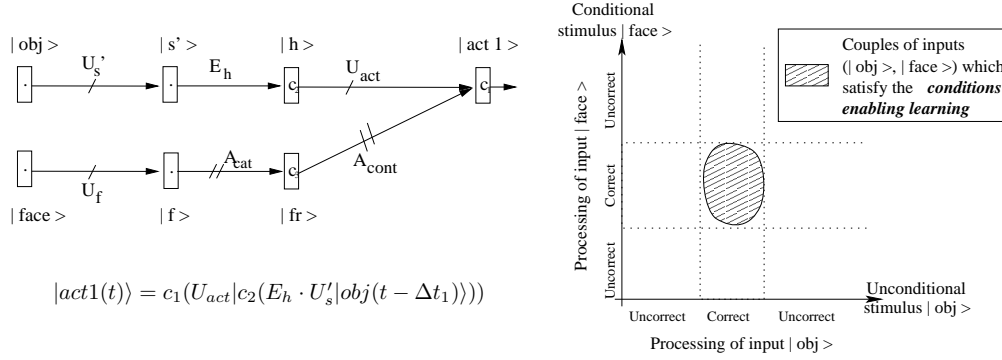
Both figure 17 and equation 12 shows the crucial role of the c_1 operator and the A_{cont} matrix as they enable the architecture to perform the recognition of the gaze direction and its association with the correct the actions of the robot (i.e. look at the same objects the human caregiver is looking at). Figures 16 and 18 and equation 12 describe the temporal constraints of the experimental setup. To sum up, the dynamics of the interaction loop between the robot and its environment has been formalized. The human/robot system constitutes a dynamical system which should acquire and perform joint attention. We will try now to study which are the constraints to fulfill in order to obtain this dynamical behavior.

5 Learning constraints

Assuming that the environment is restricted to the Conditions Enabling Learning (CEL), we will apply the CSF to characterize the *constraints on the dynamics* of the whole system *Agent1 / Agent2 / environment*. We will demonstrate that the correct achievement of JA by the robot implies a strong cooperation of the caregiver. For instance, learning cannot converge if the robot faces another robot controlled by the same architecture (even if this other robot has already learned to perform JA). To solve this problem, there is a need to change the internal dynamics of the robot architecture.

In order to study the JAL ability of the whole system robot/caregiver, we will first determine the *constraints on the dynamics* enabling learning and then, we will study what are the interaction capabilities acquired by this learning. In section 2, two aspects of the learning constraints were distinguished. First there are the *conditions enabling learning* (CEL) due to the learning mechanism and its implementation. The CEL depend on the building of the architecture, are determined by the classic studies of learning convergence and are not addressed by the CSF. Second there are the *constraints on the dynamics* of the whole system *architecture-environment*. The respect of these constraints is a necessary condition to allow interactions between the architecture and its environment. The CSF will enable to characterize these constraints. Now we will suppose that the environment is restricted to the *conditions enabling learnings* (see fig19).

Under the CEL, the “*after learning* simplifications” of the architecture can be performed. These simplifications lead to two different architectures (one for the *unconditional* pathway and another for the *adaptive* pathway). We will study what are the possible dynamics of each pathway. In the environment restricted to the CEL, learning may converge if both *Unconditional* and *Adaptive* pathways compute the same output : the two pathways are equivalent. Thus, after learning and in the environment restricted to the CEL, the term $U_{act}|c_2(E_h \cdot U'_s|obj(t - \Delta t_1)\rangle)$ representing the *unconditional pathway* of the robot architecture (Equ.12) should compute the same output $|act1\rangle$ as the term $A_{cont}|c_3(A'_{cat} \cdot \xi'(|act1(t - \Delta t_3)\rangle, |obj(t - \Delta t_3)\rangle))$ representing the *adaptive pathways* ($\Delta t_3 = \Delta t_1 + \Delta t_2$ is the duration of a whole


 FIG. 19 – Intuitive representation of the *conditions enabling learning* (CEL)

interaction loop and Δt_1 is the processing duration within the robot). After learning and under the CEL, Equ.12 should be equivalent on one hand to equ.13 and on the other hand to equ. 14 ($|act1\rangle$ computed by the adaptive pathway) :

$$|act1(t)\rangle = c_1(U_{act}|c_2(E_h \cdot U'_s|obj(t - \Delta t_1)\rangle)) \quad (13)$$

$$|act1(t)\rangle = c_1(A_{cont}|c_3(A'_{cat} \cdot \xi'_t(|act1(t - \Delta t_3)\rangle, |obj(t - \Delta t_3)\rangle))) \quad (14)$$

Considering that $E_h \cdot U'_s$ and U_{act} are two matrices and c_1 and c_2 are competition mechanisms, we can simplify a chain of Unconditional links and competitive mechanisms. A matrix U''_s does exist which verifies $c_1|U''_s = c_1(U_s|c_2(E_h \cdot U'_s))$ (U''_s unconditional because both U_{act} and $E_h \cdot U'_s$ are unconditional). The simplification of the reflex chain does not influence the system dynamics (see section 2 $c_1(U|c_2(U|x)) \equiv c_1(U'|x)$) and Appendix 8.2 for details). Equation 13 becomes equation 15 :

$$|act1(t)\rangle = c_1(U''_s|obj(t - \Delta t_1)\rangle) \quad (15)$$

Considering that, on one side, A_{cont} and A'_{cat} are two adaptive matrices and, on the other side, c_1 and c_3 are competition mechanisms, we can also simplify the chain of *Adaptive* mechanisms. A matrix A'' does exist which verifies $c_1(A''|x) = c_1(A_{cont}|c_3(A'_{cat}|x))$ (A'' adaptive because A_{cont} and A'_{cat} are adaptive). The simplification of this chain can influence the real adaptation capacity of the system, but theoretically this should not influence the system dynamics (see the Appendix 8.2 for the details). Equation 14 becomes equation 16 :

$$|act1(t)\rangle = c_1(A'' \cdot \xi'_t(|act1(t - \Delta t_3)\rangle, |obj(t - \Delta t_3)\rangle)) \quad (16)$$

Finally, the *constraints on the dynamics* of each pathway (equations 15 and 16) are satisfied if both equations of the set 17 are verified (i.e. the two pathways of the architecture, *Unconditional* and *Adaptive*, produce the same result $|act1\rangle$) :

$$\begin{cases} |act1(t)\rangle = c_1(A''|\xi'_t(|act1(t - \Delta t_3)\rangle, |obj(t - \Delta t_3)\rangle)) \\ |act1(t)\rangle = c_1(U''_s|obj(t - \Delta t_1)\rangle) \end{cases} \quad (17)$$

The set of equation 17 ensure the coherence of the whole architecture dynamics after learning, under the CEL. In the environment restricted to the CEL, learning may converge if both *Unconditional* and *Adaptive* pathways compute the same output : the two pathways are equivalent. After learning and in the environment restricted to the CEL, according to the set of equations 17 we should have $c_1(U_s''|obj(t - \Delta t_1))) = c_1(A'' \cdot \xi'(|act1(t - \Delta t_3)), |obj(t - \Delta t_3)))$. These constraints are necessary to allow learning convergence. This proves and means that the gaze direction of *Agent2* $\xi'(|act1), |obj)$ and the $|obj\rangle$ stimulus should be correlated. Hence, to enable *Agent1* to learn associations between gaze direction and actions, *Agent2*'s actions must be related either to objects locations or to *Agent1*'s actions or to both. These constraints will be now the ground for the study of the architecture dynamics depending on *Agent2*'s behavior.

6 Which dynamics enable convergence of learning ?

We will study now which dynamics enable the convergence of learning. The operator ξ characterizes the human caregiver's behavior (*Agent2*) and its ability to link at will the robot's gaze direction (*Agent1*) with the objects position through its own gaze direction.

If ξ function (*Agent2*'s behavior) only depends on objects, *Agent2* gazes at the objects without relating his/her gaze to *Agent1*'s actions (for instance choosing randomly target object). Objects' positions are the only link between the actions of *Agent1* and the direction of gaze of *Agent2* : the behavior of *Agent2* is totally independent from the actions of *Agent1* $|act1\rangle$ (robot actions, see fig.20).

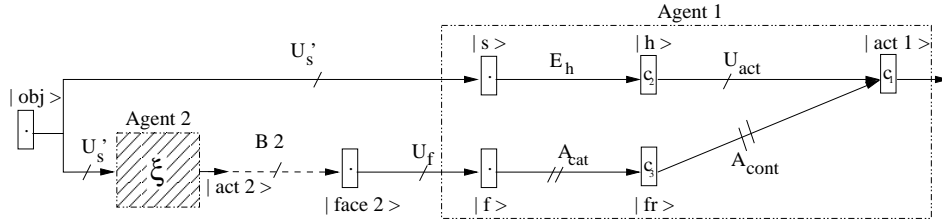


FIG. 20 – *Agent2* facing the robot only sees the objects.

In this case, ξ' (the function computing the action vector $|act2\rangle$ of *Agent2*) is only a function of the objects location $|obj(t - \Delta t_3)\rangle$: $|act2\rangle = \xi'|obj\rangle$. The set of equations 17 becomes :

$$\begin{cases} |act1(t)\rangle &= c_1(A''|\xi'(|obj(t - \Delta t_3))) \\ |act1(t)\rangle &= c_1(U_s''|obj(t - \Delta t_1))) \end{cases} \quad (18)$$

As long as the objects are not moved, whatever is Δt , the objects vector is constant and reminds the same at time t and time $t + \Delta t$: $|obj(t)\rangle = |obj(t + \Delta t)\rangle$. Hence, given a fixed location of the objects

the system of equations becomes :

$$\begin{cases} |act1(t)\rangle &= c_1(A''|\xi'(|obj(t))\rangle) \\ |act1(t)\rangle &= c_1(U_s''|obj(t)\rangle) \end{cases} \quad (19)$$

We can deduce :

$$c_1(A''|\xi'(|obj)\rangle) = c_1(U_s''|obj)\rangle) \quad (20)$$

The processing of the objects $|obj\rangle$ by the *Unconditional* pathway of the robot should be the same as the processing of the objects by successively *Agent2* and the *Adaptive* pathway of the robot. Equation 20 sums up the conditions enabling learning convergence of the whole system robot/human/obj when the experimenter does not take into account the robot's direction of gaze to perform her actions. These *constraints on the dynamics* are in redundancy with the classical *conditions enabling learning* (CEL) given by the learning mechanism itself : if the stimuli are correlated, learning converges. Given these CEL, learning of associations between $|face2\rangle$ and $|act1\rangle$ should be effective and will verify equ.20. In other words, after learning convergence, the actions of the robot computed using the gaze direction of the experimenter $|face\rangle$ (*Adaptive* pathway) verify equation 21 :

$$|act1(t)\rangle = c_1(A''|face2(t - \Delta t_1)\rangle) = c_1(\alpha U_s''|obj)\rangle). \quad (21)$$

The actions of the robot $|act1(t)\rangle$ only depend on the objects location : $|face\rangle$ is associated to the objects locations. If there was only one object, the robot would look where the human looks and in this trivial case, JA is performed. But if there were several objects during learning, thus, after learning the robot looks in the direction of one of the objects, not necessarily the one the human is looking at. This behavior is not relevant for JA. Finally, equation 21 points out the fact that if, in the experimental setup, both the objects do not move and the caregiver only takes into account the objects, the system does not contain the internal resources enabling the achievement of joint attention. Hosoda et al. have shown that this lack can be corrected by an external intervention [Hosoda et al., 2004]. If the objects are moved (action out of the system robot/objects/human) the relevant associations will be the ones that are more reinforced by learning and thus JAL will be achieved.

If ξ function (caregiver's behavior) only depends on the robot's actions $|act1\rangle$, *Agent2* does not take into account the objects on the table and only considers the direction of gaze of *Agent1* (see figure 21 for the corresponding schema).

ξ' (the function computing the actions vector of *Agent2* $|act2\rangle$) is only a function of $|act1\rangle$: $|act2\rangle = \xi'|act1\rangle$ Hence system 17 becomes equivalent to :

$$\begin{cases} |act1(t)\rangle &= c_1(A''|\xi'(|act1(t - \Delta t_3)\rangle)) \\ |act1(t)\rangle &= c_1(U_s''|obj(t - \Delta t_1)\rangle) \end{cases} \quad (22)$$

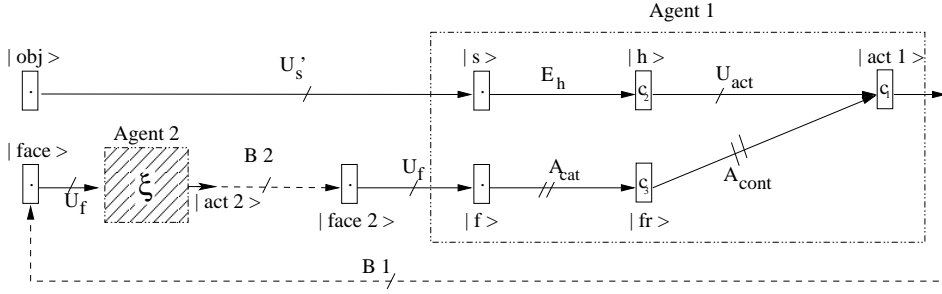


FIG. 21 – *Agent2* (facing the robot) does not pay attention to objects ($|obj\rangle$) but only takes into account the gaze direction of the robot ($|act1\rangle$).

While the objects location does not change, $|obj(t - \Delta t_1)\rangle = |obj(t)\rangle$, we have the set of equations 23 :

$$\begin{cases} |act1(t)\rangle &= c_1(A''|\xi'(|act1(t - \Delta t_3)\rangle)) \\ |act1(t)\rangle &= c_1(U_s''|obj\rangle) \end{cases} \quad (23)$$

In equations 23, the adaptive matrix A'' can converge if $|act1(t)\rangle = |act1(t - \Delta t_3)\rangle$ ($\Delta t_3 = \Delta t_1 + \Delta t_2$ is the duration of an interaction loop). Conversely, if there is no relation between $|act1(t)\rangle$ and $|act1(t - \Delta t_3)\rangle$, the matrix A'' verifying equ.23 does not exist. That allows to define the *constraints on the dynamics* of equation 24 which enable the convergence of learning.

$$\forall t, |act1(t)\rangle = |act1(t - \Delta t_3)\rangle \quad (24)$$

Equation 24 shows that the only thing *Agent1* can learn is a temporal relation between its action at time t and at time $t - \Delta t_3$. In equation 10, we have defined the duration of an interaction loop Δt_3 as $\Delta t_3 = \Delta t_1 + \Delta t_2$ with Δt_1 the processing time within the robot and Δt_2 the processing time within the environment. Hence, the temporal relation Δt_3 that *Agent1* is able to learn can be decomposed in two parts. As a first part, Δt_1 is due to *Agent1* own architecture and it is thus fixed by the design of the architecture. As a second part, Δt_2 is due to *Agent2* behavior and thus cannot be controlled by the robot : Δt_2 can take several values depending on *Agent2*'s behavior. If *Agent2* is a mirror, its duration of processing is null, $\Delta t_2 = 0$, and then Δt_3 can be written as follows (equ. 25) :

$$\Delta t_3 = \Delta t_1 + \Delta t_2 = \Delta t_1 + 0 = \Delta t_1 \quad (25)$$

The *constraints on the dynamics* of the robot action $|act1\rangle$ (equ.24) becomes equation 26 :

$$\forall t, |act1(t)\rangle = |act1(t - \Delta t_1)\rangle \quad (26)$$

To satisfy this equation, the robot must demonstrate a cyclic activity where its actions at time t is the same as its actions at time $t - \Delta t_1$: $|act1(t)\rangle = |act1(t - \Delta t_1)\rangle$. Yet nothing in the architecture enables us to assume that *Agent1* has this cyclic activity. Learning cannot converge. If *Agent2* is an imitator

with an architecture quite similar to *Agent1*'s, the processing durations of both agents are quite the same, $\Delta t_2 \simeq \Delta t_1$ and then the whole interaction loop duration Δt_3 is given by equation 27 :

$$\Delta t_3 = \Delta t_1 + \Delta t_2 = \Delta t_1 + \Delta t_1 = 2 \cdot \Delta t_1 \quad (27)$$

And the *constraints on the dynamics* of the robot action $|act1\rangle$ (equ.24) becomes equation 28 :

$$\forall t, |act1(t)\rangle = |act1(t - 2 \cdot \Delta t_1)\rangle \quad (28)$$

To satisfy this new equation, the robot must demonstrate a cyclic activity where its actions at time t is the same as its actions at time $t - 2 \cdot \Delta t_1$: $|act1(t)\rangle = |act1(t - 2 \cdot \Delta t_1)\rangle$. Here again, nothing in the architecture enables us to assume that *Agent1* has this cyclic activity. Learning cannot converge. If *Agent2* is a human imitator, we can assume that his/her processing speed is so much higher compared to the robot's one that it can be neglected ($\Delta t_2 \ll \Delta t_1$). Hence $\Delta t_2 \simeq 0$ and the duration of an interaction loop Δt_3 becomes $\Delta t_3 = \Delta t_1 + \Delta t_2 \simeq \Delta t_1 + 0 = \Delta t_1$. It is the same situation as in equation 25 when the robot faces a mirror : the robot's learning cannot converge.

At last, if *Agent2* demonstrates a much more complex behavior consisting in anticipating the *Agent1*'s action, then $\Delta t_2 \simeq -\Delta t_1$. The duration of the interaction loop Δt_3 is given by equation 29 :

$$\Delta t_3 = \Delta t_1 + \Delta t_2 \simeq \Delta t_1 - \Delta t_1 = 0 \quad (29)$$

The *constraints on the dynamics* of the robot's action $|act1\rangle$ (equ. 24) are described by equation 30 :

$$\forall t, |act1(t)\rangle = |act1(t)\rangle \quad (30)$$

This condition is satisfied in any case. If the human caregiver anticipates the robot's actions, learning of associations between $|face2\rangle$ and $|act1\rangle$ is possible. CSF allowed us to demonstrate that the experimenter's anticipation of the robot behavior is a necessary condition for learning since learning cannot converge in any other case. As a consequence *constraints on the dynamics* of the caregiver behavior have to be added to the CEL. Let us now assume that both the CEL and the *constraints on the dynamics* are satisfied. After learning, we have $\Delta t_3 = 0$ in equation 23 and thus the associations learned will verify equ.31 :

$$|act1(t)\rangle = c_1(A''|\xi'(|act1(t)\rangle)) = c_1(A''|face2)) \quad (31)$$

After learning has converged and even in an environment without any object, the robot looks at the same location as the human is looking at. The robot is here able to achieve JA capabilities, but it will completely depend upon the caregiver ability to maintain the interaction. Once again, the capability to achieve JA in the robot/human/objects system is not due to the robot architecture but to the human experimenter.

The formalization of the constraints on the duration of computation within the robot appears necessary to explore the different dynamics which can occur in the proposed experimental setup. We have analyzed the *constraints on the dynamics* for learning convergence, we have retrieved the experimental

results of the JAL architecture and we have also shown the limits of the architecture due to its lack of internal dynamics. All the *constraints on the dynamics* for learning convergence focus on the human caregiver's behavior : there is no possibility to control the robot's reaction time or to make the robot take explicitly account of the other agent's dynamic.

Definition of learning through a temporal window :

Now, let us demonstrate that light changes in the robot's learning mechanism can influence significantly its learning dynamics. The only changes to be integrated within the architecture concern the temporal window for learning. Presently, the only associations learned are associations between co-occurring unconditional and adaptive signals. Enabling learning within a temporal window corresponds to enable the learning of associations between unconditional and adaptive signals that do not co-occur exactly but occur during the same temporal window. Given a temporal window for learning $[t_m, t_M]$, learning converges if at every time t , the *Unconditional* signal is correlated with an *Adaptive* signal occurring during the same temporal window : the correlated *Adaptive* signal must occur at $t+t_0$ with $t_0 \in [t_m, t_M]$. With U an unconditional matrix, A an adaptive matrix for learning, $|s\rangle, |f\rangle$ stimuli depending on time, and c a competition mechanisms, the definition of learning within a temporal window is summarized by equation 32.

$$\forall t, \exists t_0 \in [t_m, t_M] / c(U|s(t)) = c(A|f(t+t_0)) \quad (32)$$

If the *contingency learning* of the JAL architecture is enabled within a temporal window $[t_m, t_M]$, the set of equations 17 characterizing the *constraints on the dynamics* for learning convergence becomes the set 33, with $\Delta t_3 = \Delta t_1 + \Delta t_2$ the duration of a complete interaction loop :

$$\forall t, \exists t_0 \in [t_m, t_M] / \begin{cases} |act1(t)\rangle &= c_1(A''|\xi'(|act1(t+t_0-\Delta t_3)\rangle, |obj(t+t_0-\Delta t_3)\rangle)) \\ |act1(t)\rangle &= c_1(U''_s|obj(t+t_0-\Delta t_1)\rangle) \end{cases} \quad (33)$$

Notice that given a temporal window of null width (which corresponds to the original experimental setup of JAL), the set of equations 33 is the same as previously (without using temporal windows, see equ.17). Notice also that if the human caregiver just takes into account the objects, the set of equations 33 does not depend on time and becomes identical to the equation 20. We will consider that the human (*Agent2*) only takes into account the robot's actions ($|act1\rangle$). Then, with a temporal window for learning of width $[t_m, t_M]$, the set of equations which defines the *constraints on the dynamics* for convergence of learning (equ.23) becomes the set of equations 34 :

$$\forall t, \exists t_0 \in [t_m, t_M] / \begin{cases} |act1(t)\rangle &= c_1(A''|\xi'(|act1(t+t_0-\Delta t_3)\rangle)) \\ |act1(t)\rangle &= c_1(U''_s|obj\rangle) \end{cases} \quad (34)$$

According to the *Agent2*'s functionality (ξ' function), this constraint for learning convergence can be written :

$$\forall t, \exists t_0 \in [t_m, t_M] / |act1(t)\rangle = |act1(t+t_0-\Delta t_3)\rangle \quad (35)$$

Equation 35 shows two things. First, to enable the learning of any association, the temporal window $[t_m, t_M]$ must be wide enough so as to contain Δt_3 (otherwise equ.34 cannot be verified). Second, the temporal window must be as tight as possible to enable the learning of associations to converge. This latter condition is due to the fact that within a temporal window several associations are reinforced (we note that number $n_{[t_m, t_M]}$). To allow the learning to converge, one of these associations at least must be more reinforced than the others. We show in *Appendix 8.3* that to enable the robot to learn associations, $n_{[t_m, t_M]}$ must be inferior to the number of "faces" $|face2\rangle$ the robot may see, n_{face2} . Finally the two following conditions must be satisfied (set of conditions 36) to allow the learning to converge :

$$\begin{cases} \Delta t_3 \in [t_m, t_M] \\ n_{[t_m, t_M]} < n_{face2} \end{cases} \quad (36)$$

After the learning convergence, we have equation 37 :

$$\forall t, \exists t_0 \in [t_m, t_M] / |act1(t)\rangle = c_1(A''|\xi'(|act1(t+t_0-\Delta t_3)\rangle))) \quad (37)$$

and according to the learning constraints of equ.36, $t_0 = \Delta t_3$ should verify this equation at every time t . Finally we have $|act1(t)\rangle = c_1(A''|\xi'(|act1(t)\rangle))$. That is the same situation as in equation 31 : the robot and the human should look at the same location. The robot should achieve JA capability.

7 Conclusion

Using the CSF, we have studied the capacity of the JAL (Joint Attention Learning) architecture when interacting with its environment. We have theoretically immersed the agent controlled by the JAL architecture in its environment (a dynamic experimenter and static objects); we have described the sensory inputs of the robot depending on both the object and on its own actions mediated by the human caregiver (noticing that experimenter's actions depend on the robot's actions); in other words, we have closed the interaction loop. This set of operations has allowed us to formalize the bio-feedback function of the interaction : the robot can learn about itself by the media of its social environment.

After the formalization of the interaction loop, we have focused on the determination of the stable states of the interaction with the environment. First we have determined the CEL (Conditions Enabling Learning) according to the architecture design and second we have defined the additional *constraints on the dynamics* enabling learning to converge, i.e. the entwined constraints on the dynamics of each part of the system "JAL architecture-environment" which, under the CEL, may enable learning to converge. We have determined these *constraints on the dynamics* for every possible dyads "JAL architecture-environment" (JAL/human, JAL/naive JAL, JAL/expert JAL...). Under these dynamical constraints but in the environment not restricted to the CEL, we have determined, for each of these dyads, what were the benefits of learning in terms of dynamics, behavioral attractors and ability to achieve JAL. The CSF allowed us to replicate in a theoretical way the experimental results concerning the JAL architecture [Hosoda et al., 2004] and we have demonstrated that the correct achievement of JA by the robot implied

a strong cooperation of the caregiver, all the “efforts” to maintain interaction between the robot and the human should be made by the human.

We highlighted time as the crucial issue for the achievement of Joint Attention by the JAL architecture. That has allowed us to extend the previous results concerning the JAL architecture and to show what were the necessary and also the best conditions for the convergence of learning. We have shown that a small change on the dynamics of the *Contingency Learning* (enlargement of the temporal window enabling learning) modifies the *Sensory-Motor* relations in the interaction loop and thus the development of the robot. In fact it enables the robot to be involved in and to benefit from various dynamics of interactions instead of only one as in the original design. The robot should benefit from interaction with an interlocutor who anticipates its actions (original experimental setup) or who imitates it or whose actions only depend on the location of the objects. This enrichment of the architecture should make the robot more flexible to its interlocutor behavior and thus much more readily to join attention and to communicate.

All these findings proceed from the specific studie of the JAL architecture but they address and partially answer much more general issues.

By replicating the experimental results of Hosada et al. and Nagai et al., we have shown that, given a specific two-agents system and an experimental setup, the CSF characterizes the capability of one agent to learn sensory-motor associations by the media of the other agent. The CSF enables to determine theoretically if an agent can be involved into bidirectionnal social interactions : does the agent adapt its own dynamics to its partner? which dynamics does it stand? should its partner be an expert in social interactions? or could its partner be a naive agent (for instance the same as itself)? Moreover it enables to determine also how much the agent benefits from these interactions : what does it learn? is the social environment necessary to enable this learning? does the agent improves its interaction capabilities accross time (for instance learning JA)? . In more general words, the CSF enable to determine theoretically if an agent can participate in communication : The act of communicate does not lead to transfer information from the sender to the receiver, but rather to mould together a common world via a joint action³.

This study has not required any adaptation nor modification of the CSF rules (specific to the JAL architecture). Our formal analysis can be applied to other architectures in the same way as it has previously been used for our own architectures [Gaussier et al., 2004, Gaussier et al., 2003, Nadel et al., 2005] and here for the architecture of Hosada et al. and Nagai et al.. Hence, the CSF should enable to compare these different architectures -a timely challenge if we consider the ever growing number of different architectures that are claimed to be original ones. The CSF should enable to determine which subparts of them are equivalent, different, or really innovative compared to others. The CSF may avoid thousands of architectures to be just prototypes without any coherence and connection.

With implications for every embedded robotics and furthermore for human-robot interactions, the

³“L’acte de communiquer ne se traduit pas par un transfert d’information depuis l’expéditeur vers le destinataire, mais plutôt par le modelage mutuel d’un monde commun au moyen d’une action conjuguée”, [Varela, 1989].

constraints on the dynamics (enabling learning to converge) have been shown to be tightly linked to the timing of both the learning mechanism and the interaction loop. We have shown that the timing of the different processes (within and outside the robot) is crucial to enable a robot to detect and learn relations between its sensations and its actions : the delay necessary for information to go through an “interaction loop” (i.e. to go from the robot to the environment, including other agents, and to return) should be shorter than the temporal window within which the robot can learn relations.

Theoretical framework like the PDP (Parallel Distributed Processing [Rumelhart et al., 1989]) and more recent machine learning paradigms allow a theoretical study of input/output systems but are not sufficient to study a system such as the JAL architecture which interacts with other *Cognitive Systems*. The commonly admitted problem is that when two dynamical systems interact, the dynamics of this interaction is more than the sum of the dynamics of the two. To formalise an architecture using the CSF is to address its study from the angle of dynamical systems. The CSF forces to study the architecture embodied, embedded in its environment and as being part of a whole dynamical system. The choice of the simplification rules of the CSF proceeds from these constraints : it has been necessary to discriminate two time periods in the cognitive processes, *before learning* and *after learning* ; the timing issue described above appeared as crucial for interactions. Within this framework the CSF adds a contribution to machine learning theories and provides a way to formalize systems in interaction and to compare interactive architectures despite of differences in implementation details and furthermore the CSF is heuristic, it requires choices of the ways to address the CS issues, choices which can and should be commented by roboticists, psychologists and neurobiologists.

Références

- [Beer, 1995] Beer, R. D. (1995). A dynamical systems perspective on agent-environment interaction. *Artificial Intelligence*, (72) :173–215.
- [Berthoz, 1997] Berthoz, A. (1997). *Le sens du mouvement*. Odile Jacob, Paris.
- [Bourgine and Stewart, 2004] Bourgin, P. and Stewart, J. (2004). Autopoiesis and cognition. *Artif. Life*, 10(3) :327–345.
- [Breazeal and Scassellati, 1999] Breazeal, C. and Scassellati, B. (1999). A context-dependent attention system for a social robot. In *Sixteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence : IJCAI99*, Stockholm, Sweden.
- [Gaussier, 2001] Gaussier, P. (2001). Toward a cognitive system algebra : A perception/action perspective. In *European Workshop on Learning Robots (EWLR)*, pages 88–100, <http://www-etis.ensea.fr/~neurocyber/EWRL2001-gaussier.pdf>.
- [Gaussier et al., 2004] Gaussier, P., Baccon, J., Prepin, K., Nadel, J., and Hafemeister, L. (2004). Formalization of recognition, affordances and learning in isolated or interacting animats. In *The Society for Adaptive Behavior SAB'04*, MIT Press, Los Angeles, CA, USA.
- [Gaussier et al., 2003] Gaussier, P., Prepin, K., and Nadel, J. (2003). Toward a cognitive system algebra : Application to facial expression learning and imitation. In *Embodied Artificial Intelligence*, pages 243–258.
- [Gaussier and Zrehen, 1995] Gaussier, P. and Zrehen, S. (1995). Perac : A neural architecture to control artificial animals. *Robotics and Autonomous System*, 16(2-4) :291–320.
- [Gergely and Csibra, 2005] Gergely, G. and Csibra, G. (2005). The social construction of the cultural mind : Imitative learning as a mechanism of human pedagogy. *Making Minds II : Special issue of Interaction Studies*, 6 :3 :463–481.

- [Hosoda et al., 2004] Hosoda, K., Sumioka, H., Morita, A., and Asada, M. (2004). Acquisition of human-robot joint attention through real-time natural interaction. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, volume 3, pages pp.2867–2872. IEEE/RSJ.
- [Kozima et al., 2003] Kozima, H., Nakagawa, C., and Yano, H. (2003). Attention coupling as a prerequisite for social interaction. In *2th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, pages 109–114. IEEE, IEEE Press.
- [Lau and Triesch, 2004] Lau, B. and Triesch, J. (2004). Learning gaze following in space : a computational model. In *3rd International Conference for Development and Learning : ICDL'04*, La Jolla, California, USA.
- [Maillard et al., 2005] Maillard, M., Gapenne, O., Hafemeister, L., and Gaussier, P. (2005). Perception as a dynamical sensori-motor attraction basin. In Springer-Verlag, editor, *Lecture Notes in Artificial Intelligence - VIIIth European Conference on Artificial Life ECAL05*, page in press, Canterbury.
- [Mataruna and Varela, 1980] Mataruna, H. and Varela, F. (1980). *Autopoiesis and Cognition : the realization of the living*. Reidel, Dordrecht.
- [Morita et al., 2004] Morita, A., Yoshikawa, Y., Hosoda, K., and Asada, M. (2004). Joint attention with strangers based on generalization through joint attention with caregivers. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2004)*, volume 4. IEEE/RSJ.
- [Nadel et al., 2005] Nadel, J., Prepin, K., and Okanda, M. (2005). Experiencing contingency and agency : first step toward self-understanding? In Hauf, P., editor, *Making Minds II : Special issue of Interaction Studies 6 :3 2005*, pages 447–462. John Benjamins publishing company.
- [Nagai, 2005a] Nagai, Y. (2005a). Joint attention development in infant-like robot based on head movement imitation. In AISB, editor, *Third International Symposium on Imitation in Animals and Artifacts : AISB'05*.
- [Nagai, 2005b] Nagai, Y. (2005b). Self-other motion equivalence learning for head movement imitation. In IEEE, editor, *The fourth IEEE International Conference on Development and Learning (ICDL'05)*.
- [Nagai et al., 2003] Nagai, Y., Hosoda, K., Morita, A., and Asada, M. (2003). A constructive model for the development of joint attention. *Connection Science*, 15 :211–229.
- [Pfeifer and Scheier, 1999] Pfeifer, R. and Scheier, C. (1999). *Understanding intelligence*. MIT press.
- [Revel and Nadel, 2004] Revel, A. and Nadel, J. (2004). *Imitation and Social Learning in Robots, Humans and Animals : Behavioural, Social and Communicative Dimensions.*, chapter How to build an imitator? Cambridge University Press., to be published edition.
- [Rumelhart et al., 1989] Rumelhart, D., McClelland, J., and Group, T. P. R. (1989). *Parallel Distributed Processing*. MIT Press, Cambridge.
- [Sumioka et al., 2005] Sumioka, H., Hosoda, K., Yoshikawa, Y., and Asada, M. (2005). Motion-triggered human-robot synchronization for autonomous acquisition of joint attention. In *The 4nd International Conference on Development and Learning (IEEE'2005)*, pages 194–194. IEEE.
- [Varela, 1989] Varela, F. (1989). *Autonomie et Connaissance*. Seuil.

8 Appendix

8.1 The decomposition of a signal

Rule 1 : let us consider several signals $|s_i\rangle$ on different channels. Considering a space where these signals are independent, the different channels can be written in a single vector $|s\rangle = (|s_1\rangle, \dots, |s_n\rangle)$.

$$\begin{pmatrix} |s_1\rangle \\ \vdots \\ |s_n\rangle \end{pmatrix} = |s\rangle$$

Rule 2 : let us consider several signals $|s_i\rangle$ processed in several ways (unconditional or not) P_i and giving several outputs $|o_i\rangle : \forall i, |o_i\rangle = W_i|s_i\rangle$. Then we can write that each W_i (implying changes without consequence) manages a single signal $|s\rangle$ and gives the $|o_i\rangle$:

$$\forall i, |o_i\rangle = W_i|s\rangle \tag{38}$$

Let us consider several signals $|s_i\rangle$ processed in several ways W_i (unconditional or not) and giving several outputs $|o_i\rangle : \forall i, |o_i\rangle = W_i|s_i\rangle$. Considering a first space where the $|s_i\rangle$ are independent and a second where the $|o_i\rangle$ are independent, the equation 38 becomes equation 39 :

$$\begin{pmatrix} W_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & W_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} |s_1\rangle \\ \vdots \\ |s_n\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |o_1\rangle \\ \vdots \\ |o_n\rangle \end{pmatrix} \tag{39}$$

We can write that each W_i (implying changes without consequence) treats a single signals $|s\rangle$ and provides the $|o_i\rangle : \forall i, |o_i\rangle = W_i|s\rangle$. This is given by equation 40

$$\forall i, W'_i = \begin{pmatrix} 0 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & W'_i & & \\ & & & \ddots & \\ 0 & & & & 0 \end{pmatrix} \tag{40}$$

$$\forall i, W'_i \cdot |s\rangle = |o_i\rangle$$

Rule 3 : let us consider a single signal $|vs\rangle$ processed by several unconditional processes U_i whose outputs are $|s_i\rangle : \forall i, U_i|vs\rangle = |s_i\rangle$. We can replace the set of U_i by a single unconditional matrix U and the $|s_i\rangle$ by a single vector $|s\rangle : U|vs\rangle = |s\rangle$. Let us consider a single signal $|vs\rangle$ processed by several unconditional processes U_i which outputs are $|s_i\rangle$ (equation 41) :

$$\forall i, U_i|vs\rangle = |s_i\rangle \tag{41}$$

Considering a space where the different $|s_i\rangle$ are independent, we can replace the U_i by a single unconditional matrix U and the $|s_i\rangle$ by a single signal $|s\rangle$, and the processing of $|vs\rangle$ is written as in equation 42 :

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_n \end{pmatrix} \cdot |vs\rangle = \begin{pmatrix} |s_1\rangle \\ \vdots \\ |s_n\rangle \end{pmatrix} \tag{42}$$

$$U \cdot |vs\rangle = |s\rangle$$

Rule 4 (Merging of signals) : let us consider several signals $|s_i\rangle$ filtered in several ways (unconditional or not) W_i and giving several outputs $|o_i\rangle : \forall i, |o_i\rangle = W_i|s_i\rangle$. The $|s_i\rangle$ can be written as a single signal $|s\rangle$, the filters W_i can be written as a single filter W , and every outputs $|o_i\rangle$ can be written in a single vector $|o\rangle : |o\rangle = W|s\rangle$. If W_i includes both conditional and unconditional treatments, the resulting W matrix must be considered as a conditional treatment. In this case, it might be better to separate conditional and unconditional treatment and to use two matrices, U for unconditional and A for adaptive, instead of W . The equation becomes the system of equations 43 :

$$\begin{cases} U|s_u\rangle = |o_u\rangle \\ A|s_a\rangle = |o_a\rangle \end{cases} \tag{43}$$

Proof : Let us consider several signals $|s_i\rangle$ processed in several ways (unconditional or not) W_i and giving several outputs $|o_i\rangle : \forall i, |o_i\rangle = W_i|s_i\rangle$. It is written as in equation 44 :

$$\forall i, W_i|s_i\rangle = |o_i\rangle \tag{44}$$

Considering a first space where the $|s_i\rangle$ are independent and a second where the $|o_i\rangle$ are independent, the equation 44 becomes equation 45 :

$$\begin{pmatrix} W_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & W_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} |s_1\rangle \\ \vdots \\ |s_n\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |o_1\rangle \\ \vdots \\ |o_n\rangle \end{pmatrix} \quad (45)$$

We can write the $|s_i\rangle$ as a single signal $|s\rangle$, the filters W_i can be written as one process W on this signal, and every outputs $|o_i\rangle$ can be written in a single vector : $|o\rangle = W|s\rangle$ (see equation 46) :

$$W_s = \begin{pmatrix} W_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & W_n \end{pmatrix}, |s\rangle = \begin{pmatrix} |s_1\rangle \\ \vdots \\ |s_n\rangle \end{pmatrix}, |o\rangle = \begin{pmatrix} |o_1\rangle \\ \vdots \\ |o_n\rangle \end{pmatrix}$$

$$W_s \cdot |s\rangle = |o\rangle \quad (46)$$

Rule 5 : let us consider a single signal $|s\rangle$ filtered by an unconditional matrix U (linear application) which extracts several signals $|s_i\rangle$. We then can replace $|s\rangle$ by the several signals $|s_i\rangle$ extracted.

Let us consider a single signal $|s\rangle$ filtered by an unconditional matrix U (linear application) which extracts several signals $|s_i\rangle$ (see equ.47) :

$$U |s\rangle = \begin{pmatrix} |s_1\rangle \\ \vdots \\ |s_n\rangle \end{pmatrix} \quad (47)$$

U can thus be written as the sum of n matrix U_i (see equ.48) :

$$U = \begin{pmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |U_1\rangle \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} + \dots + \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ |U_n\rangle \end{pmatrix} \quad (48)$$

The flow of information represented by $|s\rangle$ can thus be decomposed in n signals implying a linear transformation (see 49) :

$$\begin{aligned} U|s\rangle = \begin{pmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_n \end{pmatrix} |s\rangle &= \begin{pmatrix} |U_1\rangle \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} |s\rangle + \dots + \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ |U_n\rangle \end{pmatrix} |s\rangle \\ &= \begin{pmatrix} |s_1\rangle \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} + \dots + \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ |s_n\rangle \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (49)$$

Finally the signal $|s\rangle$ can be written as n independent signals $|s_i\rangle$ without any change in the meaning of the computation.

8.2 Simplification of compound functions

Simplification of compound functions : Considering that the input of a function ξ can be written as the product of an *unconditional matrix* U by a vector $|v\rangle$ then $\xi(U|v\rangle) = \xi'(|v\rangle)$ with ξ' the compound function $\xi \circ U$.

Considering that if M_1 and M_2 are two matrices (unconditional or not) and c is a competition mechanism, then a matrix M does exist which verifies $c|M = c|M_1|c|M_2$ (M unconditional if both M_1 and M_2 are, adaptive in every other cases).

8.3 Convergence of learning given a temporal window

The *Agent1*'s architecture does not present any property of regularity between its successive actions : given an action $|act1_0\rangle$ every preceding and following actions have the same chance to occur. Let consider a specific association between a face pattern of the human $|face2_0\rangle$ and an action of the robot $|act1_0\rangle$. When $|act1_0\rangle$ occurs at time t_0 , according to the learning window, the reinforced associations are those which link $|act1_0\rangle$ with the set of human gaze directions $\{|face2(t_0+t)\rangle, t \in [t_m, t_M]\}$. We write $n_{[t_m, t_M]}$ the number of element of this latter set. Given an action $|act1_0\rangle$, $n_{[t_m, t_M]}$ associations with this action are reinforced. Now, we name n_{face2} the number of possible vectors $|face2\rangle$ which may be presented as inputs of the architecture (n_{face2} is the number of different gaze directions the human may demonstrate). If every of these inputs have the same chance to occur, then each one of them has $\frac{n_{[t_m, t_M]}}{n_{face2}}$ chances to be in $\{|face2(t_0+t)\rangle, t \in [t_m, t_M]\}$ (for a specific occurrence of $|act1_0\rangle$). If $|face2_0\rangle \in \{|face2(t_0+t)\rangle, t \in [t_m, t_M]\}$ then each one of the $n_{[t_m, t_M]} - 1$ possible irrelevant actions has $\frac{n_{[t_m, t_M]} - 1}{n_{face2} - 1}$ chances to be in the set and thus to be reinforced. A mean reinforcement \bar{R} for each occurrence of $|act1_0\rangle$ can thus be defined for each association : \bar{R}_{good} for relevant ones and \bar{R}_{bad} for irrelevant ones. If $|face2_0\rangle \in \{|face2(t_0+t)\rangle, t \in [t_m, t_M]\}$, then $\bar{R}_{good} \geq 1$ and $\bar{R}_{bad} \leq \frac{n_{[t_m, t_M]} - 1}{n_{face2} - 1}$. If $|face2_0\rangle \notin \{|face2(t_0+t)\rangle, t \in [t_m, t_M]\}$, $\bar{R} = \bar{R}_{good} = \bar{R}_{bad} = \frac{n_{[t_m, t_M]}}{n_{face2}}$. The condition for learning convergence is that $\bar{R}_{good} > \bar{R}_{bad}$. A condition for the learning convergence can thus be defined by the inequality 50 :

$$\bar{R}_{bad} < \bar{R}_{good} \Rightarrow \frac{n_{[t_m, t_M]} - 1}{n_{face2} - 1} < 1 \Rightarrow n_{[t_m, t_M]} - 1 < n_{face2} - 1 \Rightarrow n_{[t_m, t_M]} < n_{face2} \quad (50)$$

Finally to enable the robot to learn the association between its own action $|act1_0\rangle$ and the human caregiver gaze direction $|face2_0\rangle$, the two following conditions must be satisfied (set of conditions 51) :

$$\left\{ \begin{array}{l} |face2_0\rangle \in \{|face2(t_0+t)\rangle, t \in [t_m, t_M]\} \\ n_{[t_m, t_M]} < n_{face2} \end{array} \right. \quad (51)$$

3.3 Propres actions et actions de l'autre

Nous avons vu que l'*attention conjointe* est un des éléments clés de l'interaction, dans la mesure où elle consiste en la comparaison de ses propres actions aux actions de l'autre et par là à la constitution d'un contexte commun lié aux dites actions. En fait, comparer ses propres actions aux actions de l'autre revient à comparer ses propres actions avec ses propres perceptions, c'est d'ailleurs les seules données dont dispose un système autonome. Hosoda et ses collègues proposent dans leur architecture d'établir des relations entre la perception du visage de l'interlocuteur et les décisions d'action que fait l'architecture en fonction de son environnement statique (disposition des objets sur la table entre le robot et son interlocuteur).

En fait, si l'on considère l'architecture d'Hosoda et al., sa conception même n'est pas basée sur l'existence d'une boucle qui lierait la perception à l'action. Le système architecture-environnement n'est appréhendé que de manière statique, un état de ce système y est constitué d'une disposition des objets entre le robot et l'humain ainsi que d'une action de l'humain : ce qui importe ce n'est pas ici l'interaction de l'humain avec le robot mais l'interaction de l'humain avec les objets. Ainsi il n'est pas question de détecter la mise en place d'une interaction sociale avec le partenaire, mais en fait il n'est pas non-plus question de baser l'apprentissage sur cette relation avec le partenaire. Alors que l'idée est de modéliser l'*attention conjointe*, il n'est pas vraiment question d'interaction sociale.

Pour formaliser cette architecture, nous nous sommes attachés à replonger celle-ci au cœur de l'interaction et à considérer comme un tout le système constitué de l'architecture, de son corps, de son environnement physique et de son environnement social : nous nous sommes astreints à replonger dans un contexte dyadique une architecture conçue du point de vue de l'individu.

Cette approche nous a conduit à mettre en évidence que l'architecture de Hosoda et al. est incapable de bénéficier de l'interaction, en terme d'apprentissage, de dynamiques d'interaction plus diverses, comme par exemple face à un interlocuteur qui se contenterait de faire lui-même de l'*attention conjointe* en imitant le robot. Le robot de Hosoda et al. est incapable de bénéficier de l'interaction parce qu'il n'est pas en mesure d'établir des relations entre ses propres productions et les actions de l'autre liées à ces productions («social-feedback»). En effet le robot de Hosoda et al. produit une action, regarde la réaction de son interlocuteur et produit à nouveau une action, et c'est seulement à cette

nouvelle action qu'il est capable d'associer la réaction de l'interlocuteur, et non à l'action qui est à l'origine de la réaction de l'interlocuteur.

3.4 Reconstruire la dyade en interaction

Ainsi le robot de Hosoda et al. est certes capable d'apprendre, dans des conditions adaptées, à suivre la direction du regard de l'autre, mais il n'est cependant pas capable de détecter l'interaction avec l'autre (comme le nouveau-né le fait, en détectant la synchronie entre ses propres actions et les actions de l'autre [Muir and Nadel, 1998, Nadel and Tremblay-Leveau, 1999, Muir and Hains, 1999, Soussignan et al., 2006]) et il est donc pas non plus capable de réguler et moduler cette interaction en fonction des réactions du partenaire.

Nous avons donc finalement montré et explicité les raisons pour lesquelles l'architecture d'Hosoda et al. [Hosoda et al., 2004] ne peut se coupler à une autre architecture et ne peut faire émerger de la complexité de ce couplage : en lieu et place de l'émergence d'une dynamique propre au système constitué des deux agents le robot a un comportement prédéfini dans le temps consistant en l'alternance systématique de regards aux objets et regards à l'interlocuteur sans aucune modulation liée à l'état de l'interaction elle-même : l'humain dormirait en face du robot, le robot continuerait indéfiniment d'alterner regards aux objets et regards à l'humain.

Le problème pointé du doigt par notre étude théorique est un problème typique dans les études des interactions sociales, les composants de l'interaction et l'interaction elle-même sont séparés : Ici l'*attention conjointe* est obtenue par un comportement systématisé du robot, une alternance de focalisations vers l'interlocuteur et vers les objets, et ce comportement d'*attention conjointe*, indépendant même de l'interaction, est censé rendre le robot plus interactif. En fait, l'*attention conjointe*, au même titre que la *synchronie* et le *tour de rôle*, devrait faire partie des composantes de la *communication* apparaissant avec l'émergence de cette *communication*.

Il ne suffit pas de simuler de l'interaction pour obtenir de l'interaction.

3.5 Formalisation prémonitoire

Dans un cadre plus général, notre formalisation et notre construction du FSC donnent les outils et la démarche qui permettent de déterminer théoriquement si un

agent peut prendre part à de la communication telle que définie par Varela : «L'acte de communiquer ne se traduit pas par un transfert d'information depuis l'expéditeur vers le destinataire, mais plutôt par le modelage mutuel d'un monde commun au moyen d'une action conjuguée»[Varela, 1995], voir section 1.5.3. En effet la formalisation d'une architecture constitue un filtre de lecture faisant ressortir les aspects d'interaction de l'architecture avec son environnement ainsi que la manière dont cette architecture est influencée (par exemple par apprentissage) par cette interaction. Le point de vue sur l'architecture est orienté par la dynamique des systèmes et de ce fait ce sont les aspects d'émergence qui peuvent être perçus.

Formaliser l'architecture en suivant la démarche conçue avec le FSC permet de prédire son comportement dans différentes situations d'interaction : ici sur l'architecture d'Hosoda et al. [Hosoda et al., 2004] nous avons montré que la capacité d'apprentissage du robot dépend étroitement de l'état de l'interaction, si les agents sont en synchronie ou non, si l'un des agents imite l'autre ou non.

Cette formalisation permet aussi de proposer des modifications de l'architecture étudiée : nous avons proposé d'«élargir» la fenêtre d'apprentissage pour permettre au robot de tolérer une plus grande variété de dynamiques d'interaction.

Mais outre l'utilisation spécifique du formalisme permettant d'étudier théoriquement une architecture en s'épargnant les contraintes d'une implémentation, de décrire précisément les différentes situations d'interaction qu'elle supporte, ou ses enrichissements possibles, c'est l'exercice même de la formalisation d'une architecture destinée à l'interaction qui nous fournit des éléments de réponses généraux concernant l'interaction homme-robot : nous avons pour toute étude d'interaction homme-robot, soulevé la nécessité de décrire des *contraintes permettant l'apprentissage* notamment en terme de dynamique d'interaction, proposé la distinction de deux états du système (*avant apprentissage et après apprentissage*), proposé une démarche d'étude forçant à replonger toute architecture dans un contexte dyadique, même si elle est conçue du point de vue de l'individu (passant par la stabilité après apprentissage pour décrire les conditions d'apprentissage puis revenant aux dynamiques susceptibles d'être apprises), affiché comme cruciale la question des délais dans les échanges entre partenaires de l'interaction.

Ainsi, ce sont la construction et l'enrichissement du formalisme eux-mêmes qui permettent d'apporter des éléments de réponse à : Dans quelle mesure un robot donné, c'est à dire d'une part un corps et d'autre part une architecture, est-il capable d'interagir avec

l'homme ? d'interagir avec d'autres robots ? d'apprendre grâce à de telles interactions, dans quels contextes et avec quelle complexité ? Faire que le formalisme d'une part fonctionne et d'autre part soit réellement pourvoyeur d'information et d'explications, sur la dynamique de nos systèmes, se veut une démarche heuristique.

Suite à cette étude, nous proposons un cadre permettant, sinon de résoudre, au moins de caractériser clairement le problème lié aux délais temporels existant nécessairement au sein de la dyade en interaction, en définissant deux échelles de temps fondamentales dans une interaction sociale : une échelle de temps pour l'*action* et une échelle de temps pour l'*échange phatique*.

3.6 Échelle de temps de l'échange phatique Vs Échelle de temps de l'action

En fait lorsque nous proposons d'enrichir l'architecture de manière à permettre à quelques scénarios supplémentaires d'être compatibles avec l'apprentissage de l'attention conjointe par le robot, nous soulevons un problème plus général qui est celui de la définition dans le temps d'un début et d'une fin à l'action. En effet, nous proposons d'élargir la fenêtre d'apprentissage pour que le robot puisse associer des actions et des perceptions qui ne soient pas nécessairement parfaitement ajustées dans le temps : ni nécessairement coïncidentes, ni nécessairement de même durée. C'est un problème à part entière dans la mesure où l'on se rend compte ici que percevoir l'autre n'est pas quelque chose d'instantané mais que comme agir, c'est un processus dynamique qui s'écoule dans le temps avec nécessairement de l'imprécision quand à cet écoulement, ce n'est pas un processus délimité dans le temps par des frontières fixes et prédictibles. On en revient au fait qu'il faut des régulateurs de l'échange qui doivent être les signaux eux-mêmes ou au moins contenus dans les signaux échangés eux-mêmes. Comparer ses propres actions aux actions de l'autre nécessite de prendre en compte les deux systèmes, soi et l'autre, en tant que deux systèmes dynamiques couplés.

La mise en évidence de l'importance des délais dans les échanges entre partenaires de l'interaction nous a conduit à aller observer ces délais sur les films issus de nos expérience de *double-vidéo* (section 2.1). Il est évident lorsque l'on considère ces interactions naturelles, que les différentes actions de chacun des agents se succèdent, se chevauchent, se prolongent, et comme c'est flagrant entre la mère et l'enfant, se modulent en même

temps qu'elles sont produites. Les actions n'ont pas une durée prédéfinie et stable. Pour espérer obtenir des interactions intuitives, il faut admettre la variabilité de la durée de l'action et par dessus tout le fait que l'action fait partie des moyens de modulation de l'interaction en même temps qu'elle se trouve modulée par cette interaction.

Ainsi, l'*action* fait partie intégrante du contexte commun aux interlocuteurs (dans le cas de la *communication* par *imitation* l'*action* EST ce contexte commun), partagé par les interlocuteurs, et c'est autour d'une seule et même action que plusieurs signaux *phatiques* sont échangés, modulant cette action au cours même de son exécution. Il n'est alors ici plus question de fenêtre temporelle ou d'inconvénient lié au délai de chronométrie des échanges entre partenaires de l'interaction : l'*action* dure nettement plus longtemps que l'*échange phatique*.

Nous distinguerons donc la chronométrie de l'*action* de celle de l'*échange phatique* en définissant deux échelles de temps distinctes, l'échelle de temps de l'*action* et l'échelle de temps de l'*échange phatique*, la seconde étant plus fine que la première. Un choix averti de ces échelles de temps est crucial, si l'on veut permettre à deux agents de constituer un système unique au sein duquel ils communiquent : c'est ce qui permet à chacun des individus de la dyade de détecter l'interaction et de réagir non-seulement aux actions de l'autre mais bien à l'état même de l'interaction et notamment des relations entre ses propres actions et les actions de l'autre.

Cette distinction entre échelle de temps de l'*action* et échelle de temps de l'*échange phatique* répond bien à la nécessité d'être capable, pour interagir socialement, d'établir des relations entre les actions que l'on produit et le *retour par l'environnement social* correspondant à ces actions. Il semble raisonnable de conseiller aux roboticiens d'autoriser pour chacune des actions du robot, la prise en compte de plusieurs signaux phatiques de l'interlocuteur.

Nos observations des dyades mère-enfant en interaction (section 2.6.4) suggèrent que les alternances de *rôle* entre la mère et l'enfant peuvent clairement être distinguées des signaux phatiques envoyés et reçus indépendamment du «rôle» de chacun, initiateur ou non d'une action. Ainsi les deux échelles de temps sont clairement identifiables (voir tableau 2.1 section 2.6.4). D'une part l'échelle de temps de l'action de l'ordre de 1 à 2 secondes. D'autre par l'échelle de temps de l'*échange phatique* qui elle est plutôt de l'ordre du 25^{ème} de seconde .

Enfin, cette distinction entre *tour de rôle* et *alternance phatique* est en accord avec

le couplage obtenu entre nos robots contrôlés par des oscillateurs où il est clair que suivant l'échelle à laquelle on se place pour effectuer ce couplage entre oscillateurs, les signaux échangés peuvent être soit *phatique* (principalement dédiés à la régulation de l'interaction) soit des actions complètes caractérisant des *rôles* émergents entre les deux partenaires.

4. CE QUE NOUS AVONS FAIT DE CE QUE NOUS SAVIONS

Comme nous l'avons exposé au début de cette thèse, ce que nous visons est l'*émergence* de *communication* en dehors de tout protocole d'interaction. Il s'agit d'établir une communication homme-robot qui soit intuitive pour l'homme, qui soit robuste et qui permette à l'homme et au robot de bénéficier l'un de l'autre.

Nous avons vu que répondre à une telle ambition pouvait passer par l'utilisation de la fonctionnalité de communication de l'*imitation*, notamment parce que l'imitation présente les caractéristiques générales de tout système de communication : la *synchronie*, le *tour de rôle* et le *partage d'attention*.

Là où psychologie et robotique répondent encore dans une large majorité que la communication passe par un protocole, nous avons pris garde à considérer le tout dynamique (constitué des agents en interaction) plutôt que ses parties, et à modéliser l'*émergence* plutôt que le comportement observé : dans chacune de nos expériences nous n'avons pas étudié ou tenté de reconstruire l'individu social mais la dyade en interaction («Pour construire un individu capable de communiquer il est nécessaire de prendre en compte ses interlocuteurs et leur évolution au cours du temps», section 1.5.2).

Enfin, nous avons abordé chacune de nos expériences en tâchant d'appréhender la communication dans ce qu'elle a de changeant et d'évoluant au cours du temps («Il est [...] nécessaire d'appréhender la communication dans sa *diachronie*, de considérer les actions et les influences réciproques des agents qui communiquent comme des phénomènes changeant, qui évoluent au cours du temps», section 1.5.3).

Ainsi, notre question initiale s'est-elle transformée en : «*Comment obtenir des interactions entre l'homme et le robot qui puissent se mettre en place indépendamment du contexte, ou plutôt dans des contextes imprévus, sans que le robot ne soit nécessairement familier à l'humain, ni qu'un protocole particulier ne soit nécessaire à l'humain ? La langue, le protocole ou encore le contexte sont des barrières. Comment s'affranchir de*

ces obstacles, ou comment faire émerger un protocole au cours de l'interaction elle-même, comment fonder les règles de l'interaction à partir du contexte lui-même ?», section 1.3.2.

4.1 Trois composantes, trois approches, trois points de vue pour un modèle

Nous avons abordé le système constitué de deux agents qui communiquent en nous focalisant successivement sur trois de ses composantes essentielles : la *synchronie*, le *tour de rôle* et l'*attention conjointe*. Bien que définies indépendamment les unes des autres, ces trois composantes sont étroitement liées car elles co-émergent avec la communication, dépendant étroitement les unes des autres.

C'est donc au sein du système dyadique que nous avons étudié les relations entre l'émergence de chacune de ces composantes et l'émergence de la communication.

Nous avons abordé la *synchronie*, le *tour de rôle* et l'*attention conjointe*, chacun avec une approche différente. Ces approches diffèrent bien sûr en les domaines de recherche auxquelles elles appartiennent, respectivement la *psychologie*, la *neurocybernétique* et la *modélisation* mais bien plus qu'une simple question de pré carré de recherche ce sont l'échelle d'observation et les méthodes d'investigation qui diffèrent.

4.1.1 Étude de la synchronie

Ainsi nos expériences de psychologie s'intéressent à un système fonctionnel, la dyade mère-enfant. Le fait que le système soit parfaitement fonctionnel est un atout mais la contrepartie en est que c'est un système complexe que nous sommes à l'heure actuelle incapable d'appréhender autrement que dans sa globalité. Pour appréhender l'interaction multimodale précoce, nous avons manipulé l'interaction en modifiant les relations de couplage existant entre ses agents et nous avons montré que loin de la simple somme d'information, de sa simple différence ou encore de sa sélection, nous sommes certainement plus proche du couplage entre de multiples systèmes (tels que par exemple quatre oscillateurs couplés : un oscillateur par modalité, deux modalités par individu).

Nous avons repris et complété le protocole de *double-vidéo* désigné en introduction comme permettant d'étudier non pas l'homme en interaction mais l'interaction multimodale elle-même, section 1.5.4. L'échelle d'observation de la psychologie, permet de donner

la mesure de la complexité du système que constituent deux agents en interaction lorsqu'il n'est pas simplifié (bien qu'il soit des plus simples parce que pris précocement au cours du développement). Nous avons montré que pour construire un agent intuitivement interactif, tel que décrit section 1.5.3, capable de s'inscrire au sein d'un système dyadique qui communique, on profite du fait qu'il soit multimodal pour deux raisons. D'une part parce que l'on profite du supplément d'information et de sa redondance : l'association du visage et de la voix permet une meilleure interaction entre la mère et l'enfant que la voix seule, voir section 2.1. On profite d'autre part de la circonscription du contexte partagé par les systèmes en interaction : si l'on considère que les systèmes en interaction sont couplés et que chacun d'eux traite la fusion intermodale par un mécanisme de type champ de neurones dynamique, comme décrit par notre modèle section 2.2, dans l'article, la multiplicité des modalités affine la sélection de l'information constitutive de l'interaction. La multimodalité accentue le «modelage mutuel» et la «communauté du monde» définissant la communication selon Varela (fig 1.5, [Varela, 1989]).

Cependant, nous avons aussi montré que pour que interaction et multimodalité puissent co-exister, il est nécessaire que chacun des agents interactifs constitue un tout unique (section 2.1). Un tout unique non-seulement par son style, sa vitesse d'élocution et ses manières, comme la mère en direct et la mère en différé constituent une unité, mais aussi par l'ensemble des dynamiques qu'il propose pendant l'interaction, qui doivent être cohérentes, non indépendantes mais couplées, comme l'image et la voix de la mère en direct constituent une unité et contrairement à l'association de la voix en direct et l'image en différé de la mère. Entre les agents comme au sein de chacun d'eux, la synchronie n'est pas un effet de bord de l'interaction comme elle est souvent considérée (voir section 2.2), elle est caractéristique de l'état de l'interaction, à la frontière entre la perturbation réciproque et l'enrichissement mutuel.

4.1.2 Étude du tour de rôle

Là où en psychologie il s'agissait d'essayer d'appréhender le système fonctionnel «dyade en interaction», en robotique, tout le problème est justement de parvenir à construire cette dyade d'agents, fonctionnelle pour l'interaction, où les agents se couplent au sein d'un système unique. Bien que le système reconstruit ne soit pas forcément un modèle de perfection, il permet de connaître et d'évaluer le rôle de chacune de ses sous-parties.

La construction d'un robot fonctionnel est une investigation en soi. C'est une investigation accompagnée du risque que, tout à notre incapacité d'appréhender un système complet, nous simplifions les tâches que le système doit accomplir de même que nous restreignons son environnement, et que ces simplifications aient toute latitude à évacuer la complexité du problème posé. La tâche finalement résolue n'a à voir avec la fonctionnalité désirée qu'en apparence et dans un cadre restreint.

Dans notre étude nous avons effectivement simplifié à outrance la dyade de robots en interaction : ils n'ont chacun qu'un bras avec un unique degré de liberté et une caméra, et la perception comme l'action sont frustes, détection de mouvement pour la première et contrôle en fréquence de mouvements pour la seconde.

Mais cette simplification du corps du robot a justement pour but de répondre aux préoccupations soulevées dans l'introduction concernant le nécessaire lien entre le corps et la cognition, entre l'*embodiment*, l'*embeddedness* et les capacités du robot (section 1.3.3). En évacuant les problèmes liés au contrôle du mouvement, au contrôle de l'attention, nous avons pu nous focaliser sur la question qui nous préoccupe, celle de la relation entre interaction dyadique, couplage et tour de rôle. Ainsi, nous avons conçu notre plateforme robotique ADRIANA («ADaptable Robotics for Interaction ANALysis») comme devant être un *embodiment* simple d'une architecture (des bras à un degré de liberté) et adaptable en fonction de la tâche d'interaction à laquelle on la destine (la caméra peut voir ou non les bras, jusqu'à quatre bras peuvent équiper ADRIANA). ADRIANA se veut un *embodiment* complètement lié aux capacités que l'on attend de l'architecture qui l'incarne. Dans notre cas chaque agent doit avoir deux caractéristiques essentielles : produire des dynamiques même simples, il n'a donc qu'un bras, et être sensible à l'autre agent, il a donc une caméra pointée sur l'autre agent. Un *embodiment* simple et modulable, pour une *embeddedness*, dans notre cas une *embeddedness* sociale, maximale.

La simplification de l'architecture, quant à elle, a pour but de s'assurer que nous évitions l'écueil des routines et de la manipulation de représentations du monde pointé du doigt section 1.3.3. Les règles computationnelles du système sont des règles locales qui ne s'appuient pas sur des présupposés du monde. L'architecture uniquement composée d'un oscillateur ne contient de modèle ni de la tâche ni de l'environnement. L'architecture isolée n'a rien de cognitif, elle le devient lorsqu'elle agit dans son environnement par l'intermédiaire d'un corps.

Si nous n'avons certes pas encore construit de robot capable d'interagir avec l'homme, nous avons construit un robot qui s'adapte à la dynamique de son partenaire dans l'interaction en accord avec la définition de la communication de Varela et contrairement à la «tradition» robotique (voir section 1.4 dans l'introduction). Il constitue bien un système dynamique unique avec son partenaire, au sein duquel les signaux échangés et les signaux régulant l'interaction sont les mêmes. Chacun des deux agents en interaction voit émerger des dynamiques différentes de ce qu'il est en mesure de produire lorsqu'il est isolé.

Nous avons vu dans la revue de questions (section 1.5.3) que, lorsqu'ils communiquent, deux agents dépendent étroitement l'un de l'autre. C'est à dire que l'impact du signal reçu par l'un des agents dépend de son état à l'instant où il le reçoit. Comme nous l'avons vu avec les robots qui se couplent, pour qu'ils se synchronisent et prennent des tours de rôle, ce qui importe n'est pas nécessairement le nombre ou la forte puissance des signaux échangés mais l'instant où ils sont émis et reçus, instant dont dépend l'état de chacun des agents. Ainsi nous avons montré que le signal échangé était faible mais répété en des instants précis (voir section 2.6.1 figure 2.7).

Nous avons, dans nos essais de caractérisation des stimuli visuels permettant de réguler l'interaction au sein de la dyade mère-enfant, mis en évidence les dynamiques, en terme d'échelle de temps, qui sont impliquées dans l'interaction sociale.

4.1.3 Étude de l'attention conjointe

Comme nous l'avons souligné en introduction, au même titre que tout système cognitif, la *dyade en interaction* est un système physique, ancré dans le monde physique par des mécanismes dynamiques de couplage, et dont les propriétés d'évolution au cours du temps et érection de dynamiques nécessitent d'être étudiées du point de vue de la dynamique des systèmes (voir section 1.3.3).

Notre approche théorique consiste en une étude pas à pas des architectures couplées à leur environnement physique et social au travers du filtre de la dynamique des systèmes. En développant le FSC (Formalisme des Systèmes Cognitifs) nous nous sommes attaché à concilier prédictions théoriques au regard de l'architecture et résultats expérimentaux dans le monde physique (voir section 3.1). Cette approche théorique est l'outil qui permet de faire la part des choses entre soucis du détail d'une architecture et échelle du système comprenant l'architecture, le corps et l'environnement, de l'agent : pour étudier

les capacités de communication de l'architecture d'Hosoda et al. [Hosoda et al., 2004], ce qui n'entre pas dans le cadre des interactions entre l'architecture et son environnement physique et social est élagué (entre autres les mécanismes d'extraction des caractéristiques de couleur, bord et mouvement du stimulus visuel) pour ne plus laisser apparaître que ce qui concerne l'interaction sociale, c'est à dire, par exemple, la décision d'action en fonction des stimuli et le mécanisme d'apprentissage et sa dynamique (voir section 3.2).

Nous avons étudié les conditions nécessaires à la mise en place d'un contexte commun entre deux interlocuteurs lors d'une interaction en plongeant formellement l'architecture dans son environnement et en faisant différentes hypothèses de comportement du partenaire : soit le partenaire anticipe sur le comportement du robot vis-à-vis des objets posés sur la table, soit le partenaire ne tient pas compte du robot dans ses actions, soit encore le partenaire imite le robot sans se soucier des objets sur la table. L'étude théorique permet de retrouver théoriquement les résultats expérimentaux de Hosoda et al. [Hosoda et al., 2004] et d'effectuer des prédictions avec d'autres scénarios, pointant ainsi du doigt les défauts de l'architecture (voir section 3.2).

Cette étude d'un système réel déjà testé par l'équipe de Hosoda et al. considéré uniquement du point de vue des interactions et de l'évolution au cours du temps, a fait ressortir des conditions générales nécessaires à toute émergence d'une interaction entre agents sociaux. Ces conditions sont clairement une différence d'échelle entre les signaux de l'interaction et ceux constituant le dit contexte commun : les signaux mis en jeu dans l'interaction et qui servent à sa régulation doivent nécessairement s'inscrire dans un contexte ayant une certaine durée dans le temps pour pouvoir être partagés par les partenaires de l'interaction.

Ainsi comme nous l'avons décrit en introduction puis montré en développement humain, en développement robotique et enfin avec le FSC, les composants de l'interaction ne peuvent être dissociés de l'interaction elle-même, ils sont autant ses effets de bords que ses éléments structuraux et que ses indices régulateurs.

4.1.4 Complémentarité

L'utilisation conjointe des trois approches, psychologie, neurocybernétique et théorisation, pour construire et tester un modèle unique, récompense la flexibilité mentale qu'elle nécessite en apportant plus que la simple somme des approches :

- la double-vidéo seule ne soulève pas de problème particulier du point de vue des échelles de temps, le paramètre majeur qui est pointé du doigt, manipulé puis mesuré est la synchronie.

- le formalisme lui, pose le problème de la fenêtre d'apprentissage, découlant de la nécessité que la perception de sa propre action médiée par l'autre agent puisse être mise en relation avec la dite action.

→ modelées mutuellement et dans une même perspective de modéliser une communication homme-robot intuitive, théorisation et psychologie amènent la double-vidéo à traduire le problème de fenêtre temporelle comme étant en fait un problème d'échelles de temps, ceci dès que l'on observe une interaction réelle impliquant l'humain où il est évident que d'une part l'action n'est pas instantanée et que d'autre part chaque action est composée de signaux régulateurs liés à l'interaction.

→ cette nouvelle nécessité de discriminer des échelles temporelles influe directement sur l'interprétation de nos résultats de robotique, conduisant à se demander si notre couplage entre robots faisait plutôt apparaître une *alternance phatique* ou un *tour de rôle*, sachant que les deux pourraient procéder d'un tel couplage.

→ réciproquement, l'attention est alors attirée sur le fait que, que ce soit avec nos robots ou entre la mère et l'enfant, les signaux *phatiques* ne sont pas forcément intenses mais plutôt situés précisément dans le temps.

Enfin, les trois approches montrent la validité de la description de l'interaction en termes de couplage mais à des niveaux différents :

- le couplage du point de vue de la psychologie, le couplage est bidirectionnel, il peut-être facilement perturbé (par une désynchronisation ou une seconde modalité asynchrone)

- le couplage du point de vue robotique : le couplage se fait par un signal particulièrement faible entre les deux robots, mais ce couplage est symétrique et la synchronie est totale

- le couplage du point de vue théorique : la formalisation nous montre qu'il n'y a pas de capacité de couplage dans l'architecture étudiée, tout simplement parce que perception et action ne peuvent être associées, les actions et les perceptions du robot ne sont pas liées en terme de dynamique.

D'une part nous voyons le système auquel nous aspirons, d'autre part nous voyons les problèmes liés à sa construction et enfin nous n'oublions pas de nous focaliser sur la

dynamique de l'agent plongé dans son environnement et sur l'émergence de la compétence.

4.1.5 En quelques mots...

Deux choses :

L'*interaction sociale* ou la *communication* est un phénomène *émergent* qui peut être modélisé comme un *couplage de systèmes dynamiques*, où les systèmes dynamiques sont les agents qui interagissent et où le couplage est régulé par les signaux mêmes qu'il met en jeu.

Le contexte commun est un élément crucial de l'interaction, l'action est un contexte commun relativement simple, mis en jeu notamment dans l'imitation. Et le partage d'un contexte commun, et donc la communication en général, nécessite la mise en jeu de dynamiques ayant des échelles de temps différentes, parmi lesquelles on pourrait définir l'échelle de temps de l'*action* (qui permet la définition du contexte commun) et l'échelle de temps de l'*échange phatique* (qui permet de réguler l'interaction et de s'influencer l'un l'autre compte tenu du contexte commun).

4.2 Premiers pas vers l'interaction homme-robot

Le robot qui utilisait les signaux phatiques de l'humain

Jusqu'à présent, nous avons montré que les signaux mis en jeu lors de l'interaction sont les signaux qui servent à la régulation de cette interaction.

Comment construire une interaction homme-robot qui utilise les signaux de l'interaction elle-même, les signaux que l'interaction met en jeu, notamment pour s'auto-réguler ? Et du même coup, comment mesurer que le robot participant à cette interaction, extrait bien et utilise ces signaux phatiques émergeant de l'interaction intuitive ?

Nous proposons pour cela de faire apprendre au robot des associations mais avec un renforcement implicite donné par les phatiques renvoyés par l'homme. Voir l'apprentissage converger montrera deux choses : Tout d'abord que les signaux structuraux et régulateurs de l'interaction intuitive sont bien aussi les signaux porteurs d'information entre les partenaires de l'interaction. Et ensuite que ces signaux ont bien été récupérés

par le robot et qu'ils ont permis au robot de bénéficier de l'interaction en apprenant une règle liée au partenaire. De nouveaux robots pourront alors bénéficier de cette capacité d'extraction des phatiques de l'interaction pour moduler leur dynamique d'interaction et ainsi, autant qu'apprendre du partenaire, s'approcher d'une réelle *communication* avec le partenaire, commune et mutuelle.

Nous avons construit un robot capable de récupérer les signaux de l'interaction avec l'homme. Ce robot, l'une des diverses configurations possible de ADRIANA (ADaptable Robotics for Interaction ANALysis, voir section 2.6), est fonctionnel mais n'a encore été testé qu'avec trois humains et donc est encore l'objet d'études et ne permet pas de conclure quand aux résultats obtenus. Malgré cela, l'intérêt de cette étude en cours mérite son évocation parmi les perspectives de cette thèse. En effet cette étude est un pas vers l'interaction intuitive entre l'homme et le robot, dans laquelle l'homme n'a aucune connaissance sur le fonctionnement du robot et se contente d'interagir avec les règles implicites de toute dyade en interaction : *synchronie, tour de rôle et partage d'attention*.

4.2.1 Extraire les *phatiques* et le démontrer

Nous sommes revenus ici à de l'interaction homme-robot habituelle, c'est-à-dire que le robot ne s'adapte pas en terme de dynamiques à ce que fait l'homme. En effet nous nous focalisons sur le fait que l'information de synchronie entre les agents peut-être extraite de l'interaction. Cette information de synchronie n'est pas utilisée ici pour réguler l'interaction comme nous l'avons fait avec nos oscillateurs mais en tant que signal de renforcement de l'apprentissage. En effet, il est plus facile de montrer que nous avons su extraire de l'information en montrant qu'elle permet d'accélérer la convergence d'un apprentissage plutôt qu'en faisant émerger un phénomène comme l'interaction, alors que le principe même d'*émergence* est obscur.

L'expérience se déroule comme suit : L'humain est face au robot (ADRIANA) muni de deux bras à un degré de liberté et d'une caméra. Lorsque l'humain respectivement lève et baisse l'un ou l'autre bras, le robot respectivement lève ou baisse aléatoirement l'un ou l'autre de ses bras. L'humain a pour consigne de faire apprendre au robot à bouger le bras qui est du même côté (en miroir) que celui que lui, l'humain, bouge (voir fig 4.1).



Fig. 4.1: L'humain est face au robot (ADRIANA) muni de deux bras à un degré de liberté et d'une caméra. Lorsque l'humain respectivement lève et baisse l'un ou l'autre bras, le robot respectivement lève ou baisse aléatoirement l'un ou l'autre de ses bras. L'humain a pour consigne de faire apprendre au robot à bouger le bras qui est du même côté (en miroir) que celui que lui, l'humain, bouge.

4.2.2 Ce qu'il y a dans le corps d'ADRIANA

L'architecture contrôlant notre robot utilise d'une part la sous-architecture de prédiction du rythme proposée par Andry et Revel [Andry and Revel, 2006] et d'autre part une version simplifiée de la règle d'apprentissage par renforcement différé proposée par Revel [Revel, 1997]. L'idée est ici d'utiliser l'information de synchronie existant entre deux agents en interaction (un schéma et des explications détaillées de cette architecture se trouvent en annexe B).

Nous avons réutilisé la sous-architecture prédisant le rythme proposée par Andry [Andry and Revel, 2006]. Cette partie d'architecture mémorise, en une seule présentation en entrée, une séquence temporelle de signaux. Puis, lorsque le premier élément de cette séquence est de nouveau présenté en entrée, la sous-architecture prédit la suite de la séquence en sortie. Si la séquence en entrée n'est pas la séquence déjà apprise, c'est à dire si entrée et sortie ne coïncident pas, alors la prédiction est fautive. La nouvelle séquence est apprise et remplace la précédente. Nous avons modifié cette architecture pour que d'une part elle prédise le délai entre deux signaux (et non entre tous les éléments d'une séquence) puis pour que l'apprentissage ne se fasse plus en un coup mais soit une moyenne dans le temps des délais présentés en entrée (pour plus de détails sur cette partie de l'architecture voir l'annexe B.1. Nous avons implémenté en amont de cette sous-architecture un mécanisme sélectionnant alternativement l'action perçue et l'action produite.

Nous avons donc transformé la sous-architecture d'Andry [Andry and Revel, 2006] en un prédicteur de délai entre une sortie motrice du robot et la perception suivante d'un mouvement dans son environnement. Ainsi, lorsque le robot effectue une action, le temps qui s'écoule est mesuré pour d'une part prédire le délai moyen entre action et perception déjà appris et d'autre part mesurer le nouveau délai avant qu'une action extérieure soit perçue (celle-ci se réduit à du mouvement dans notre cas), et apprendre ce délai.

Nous avons ensuite implémenté dans l'architecture le calcul d'un signal de renforcement. Ce signal de renforcement qui va permettre l'apprentissage d'associations entre perception et action dépend directement de l'écart existant entre la prédiction du délai et le délai réel (la «construction» de ce signal de renforcement est détaillé en annexe B.2).

Nous avons ensuite réutilisé la règle d'apprentissage proposée par Revel [Revel, 1997]

qui permet à des liens entre groupes de neurones formels d'être modifiés en fonction d'un signal de renforcement même si ce signal de renforcement arrive en retard par rapport à l'erreur réelle. Dans notre cas, nous ne savons pas a priori quand viendra le signal de renforcement après qu'une erreur ait été faite dans la mesure où c'est l'interaction elle-même et donc l'humain en interaction qui doit générer cette erreur (sans le savoir). Cette règle d'apprentissage est utilisée pour apprendre les associations entre la latéralité de la perception et la latéralité de l'action (voir le schéma de la figure 4.2, et en annexe B.3 où l'apprentissage est détaillé).

4.2.3 Résultats préliminaires

L'humain naïf interagit avec le robot, l'apprentissage converge. Voir l'annexe B.4 pour un exemple de nos résultats et voir les vidéos sur le CD joint :

- La consigne donnée au sujet naïf est d'apprendre au robot à l'imiter en miroir, «Le robot utilise les phatiques de l'humain-demo1.mpg ».
- Ensuite, lorsque le robot imite le sujet en miroir, la consigne donnée au sujet est d'apprendre au robot à l'imiter contro-latéralement (le robot doit désapprendre et réapprendre), «Le robot utilise les phatiques de l'humain-demo2.mpg »

Nous avons d'une part commencé à montrer (sur nos trois premiers tests) que cette information de synchronie a bien un sens donné intuitivement par l'utilisateur naïf, et d'autre part montré que l'on peut l'extraire pour l'utiliser . Ainsi nous pouvons faire que le robot bénéficie de l'interaction avec l'humain. Pas parce que l'humain transmet un savoir qu'il a, comme par exemple lorsque l'humain se fait imiter par le robot, mais parce que le robot tire de l'information du déroulement de l'interaction elle-même : ce qui est pris en compte ici par l'architecture du robot ce n'est pas l'information transmise, mais bien la manière dont évolue l'interaction au cours du temps. Le seul moyen de faire apprendre au robot, ce n'est pas de lui montrer, de lui répéter, de le corriger, c'est d'interagir avec lui !

4.2.4 Remarques

Notons le fait que le signal de renforcement vient rapidement après l'erreur : la modification intuitive de l'interaction par l'homme en fonction de la réponse du robot est rapide.

Comme nous l'avons vu, notre système ne module pas son rythme d'interaction en

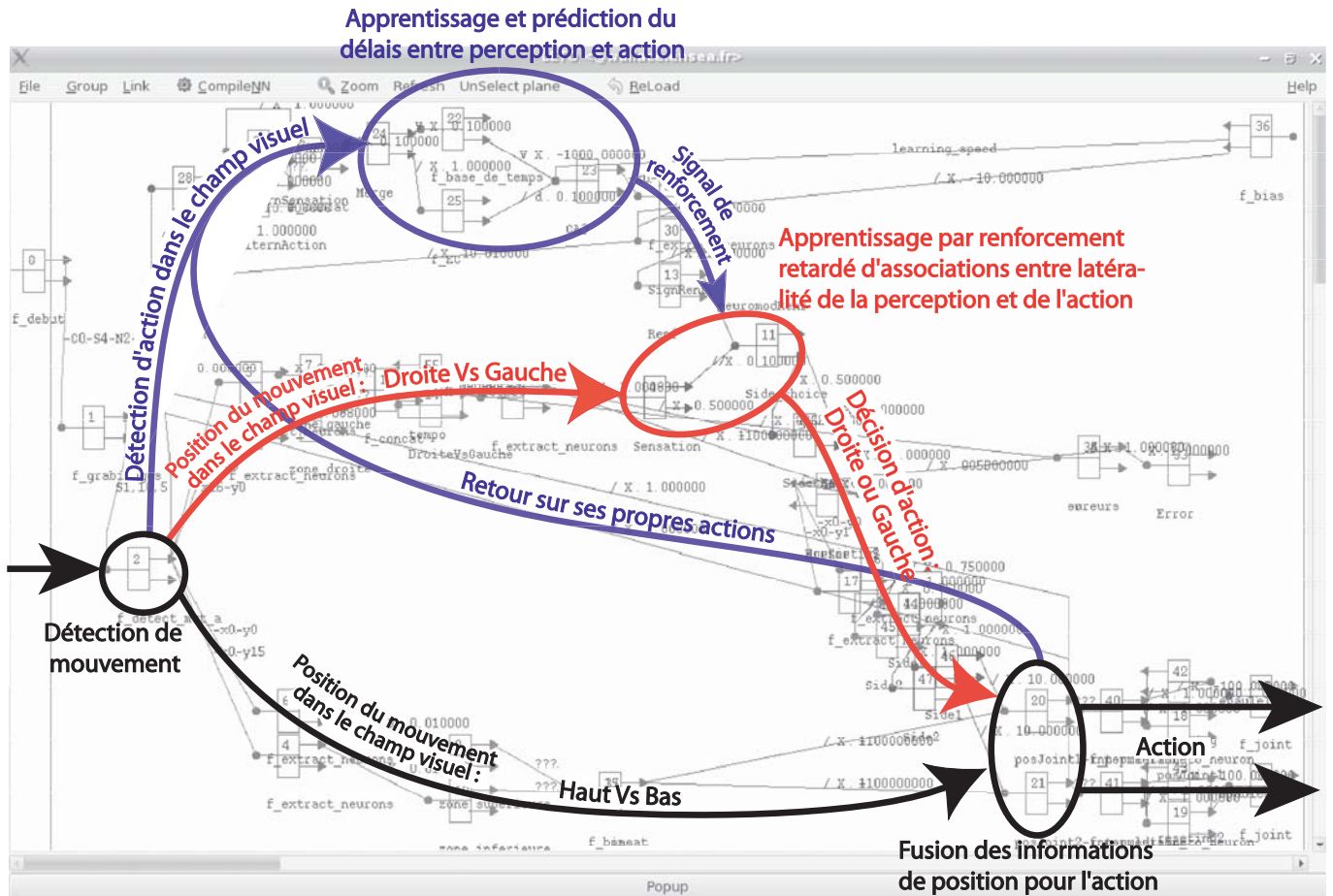


Fig. 4.2: Architecture dédiée au contrôle d'ADRIANA pour l'apprentissage d'association perception-action renforcé par la synchronie de l'interaction. Le robot détecte le mouvement dans son champ visuel. Une première voie (en bas en noir) détecte la position haute ou basse du mouvement dans le champs visuel et contrôle de manière ad-hoc le bras qui bougera respectivement vers le haut ou vers le bas. Une seconde voie (au milieu en rouge) détecte la position gauche ou droite du mouvement dans le champ visuel et l'apprentissage par renforcement permet de sélectionner l'action en fonction de cette position. Ces deux voies sont fusionnée (gauche + haut ou bas) pour produire l'action. Une troisième voie récupère les informations de détections de mouvement et de décision d'action pour apprendre et prédire les délais entre action et perception et donc la synchronie avec le partenaire puis en tirer un signal de renforcement.

fonction de son interlocuteur. Or, pour que les rythmes d'interaction de l'humain soient bien dans l'intuitif, il faut que l'humain qui interagit avec le robot ait une impression d'interaction réciproque suffisante. Pour parvenir à un tel résultat, quatre choses furent nécessaires :

- Une réaction systématique et rapide du robot au mouvement de l'humain et assimilable sans équivoque à de l'imitation. L'humain doit sentir qu'il a l'*attention* du robot.
- Une cinématique des mouvements du robot qui soit en accord avec ce qu'il est capable de détecter chez l'humain. En effet l'humain cale la cinématique de ses propres productions sur celle du robot et ce, de manière systématique, sans consigne. C'est là le reflet de l'expertise de l'humain en matière d'interactions sociales.
- Il fallait une combinaison fine d'espace des possibles constraints (en terme de vitesse de production, de degrés de liberté des bras) mais avec un degrés de liberté qui soit justement ce que le robot est en mesure de détecter et ce sur quoi l'humain joue de manière intuitive au cours d'une interaction, c'est à dire la synchronie inter-individuelle.
- Enfin, dans cette interaction asymétrique, il faut clairement que l'humain se mette à la portée du robot. Les rôles sont clairement établis par la consigne donnée à l'humain : l'humain doit faire apprendre au robot. Le robot est vraiment l'équivalent de l'enfant et l'humain celui de l'adulte. De même l'aspect du robot, non-humanoïde et particulièrement simple, dont nous n'avons pas mesuré l'effet, doit contraindre les mouvements de l'humain. L'humain, comme la mère face à son enfant dans la double-vidéo, se met à la portée du robot en adaptant son répertoire moteur.

Dernière chose, l'apprentissage converge en moyenne tous les dix signaux de renforcement, là où un renforcement explicite comparable d'association présentées au hasard aurait $1/16^1$ chance d'être correct.

Nous avons tenté de concilier architecture, embodiement et embeddedness avec la tâche que nous voulons voir accomplie par le robot. En faisant cela, nous avons montré que les signaux de l'interaction, sont tout aussi bien les signaux de la régulation de l'in-

¹ le fait qu'une «bonne» association se produise est de une chance sur quatre, ensuite le fait que le signal de renforcement différé correspondant est lieu au même instant que cette même bonne association est encore de une chance sur quatre

teraction que les signaux porteurs de l'information entre les partenaires de l'interaction.

4.3 Apport personnel et contribution

Développer et modéliser des interactions homme-robot qui soient intuitives pour l'homme se traduit par la nécessité d'effacer la frontière entre le monde computationnel, à base de représentations, du robot, et le monde réel, physique et social, de l'humain. Prenant l'imitation comme modèle, j'ai appréhendé la communication comme un phénomène émergent de l'interaction d'une dyade de systèmes dynamiques. C'est la capacité du robot à s'ancrer dans le monde social, c'est l'*embeddedness* sociale du robot qui est en jeu. La multimodalité, enrichissement du contact avec le monde physique, est un facteur susceptible d'améliorer cette *embeddedness* sociale.

Cette perspective a mené à trois études de nature différente. Dans le champ du développement humain, avec Jacqueline Nadel, nous nous sommes posé la question de la perception, au cours de l'interaction, de l'unité d'un partenaire social lorsqu'il est multimodal. J'ai modifié le protocole de double vidéo classique pour permettre de découpler son et image et ainsi étudier la relation existant entre multimodalité de l'individu et la synchronie de l'interaction. J'ai montré au moyen de trois expérimentations sur 50 dyades mère-bébé de 6 mois, que lorsqu'elle touche des systèmes multimodaux, la synchronie n'est pas une caractéristique qui existe ou n'existe pas mais qu'elle peut être partielle, être facteur d'enrichissement de l'interaction ou au contraire être sensible à la déconstruction de l'intermodalité.

Dans le champ de la robotique, cette *embeddedness* sociale doit être construite et son enrichissement par la multimodalité devra venir plus tard. Pour construire l'*embeddedness* sociale du robot j'ai construit une dyade de robots dont *embodiment* et architecture sont adaptés l'un à l'autre : les productions motrices sont adaptés aux perceptions de l'autre (ADRIANA). C'est au travers de la modélisation d'un «turn-taking» au sein de cette dyade que je me suis assuré que chacun des robots participe activement à l'interaction. En testant cette dyade de robots avec Arnaud Revel, nous avons montré la robustesse d'un tel couplage par le monde physique tout en montrant l'adéquation de nos résultats avec le grand champ d'étude du «weak coupling» entre oscillateurs.

Ayant ainsi montré que la communication peut être définie comme un couplage de

systèmes dynamiques, dans le champ de la modélisation, j'ai étudié théoriquement une architecture dédiée à l'attention conjointe, m'intéressant à ses capacités à faire émerger un contexte commun et donc à gommer la frontière entre humain et robot. Nous avons, avec Philippe Gaussier, précisé les différentes étapes de l'étude d'une architecture avec le Formalisme des Systèmes Cognitifs et j'ai défini les notions de temporalité du traitement de l'information au sein et à l'extérieur d'un agent, me permettant ainsi de souligner la nécessité d'avoir des échelles de temps différentes entre l'action et les micro-signaux (présents dans l'action) régulant l'interaction. Au vu de l'ensemble de ces résultats j'ai étudié les différentes échelles de temps chez l'humain différenciant le temps de l'«échange *phatique* » (échange de micro-signaux régulateurs de l'interaction) du temps de l'action.

Enfin, pour construire un robot capable d'utiliser les *phatiques* de l'humain, j'ai remanié une architecture de Andry permettant de prédire des délais, pour l'adapter à l'interaction via imitation en conditions écologiques avec ADRIANA, et la doter d'une capacité d'apprentissage par renforcement différé. J'ai rendu le robot capable d'effectuer un apprentissage sensori-moteur renforcé par les *phatiques* de son interaction avec un humain.

L'humain utilise pour communiquer des *phatiques*. Ce sont tout à la fois les micro-signaux émergent du couplage de l'humain avec son environnement social, et aussi les micro-signaux auxquels l'humain va être sensible pour se coupler et qui vont donc assurer son *embeddedness* sociale. C'est cette *embeddedness* sociale du robot, utilisant les *phatiques* de l'humain, qui, et ce seront mes conclusions, doit être construite pour effacer la frontière entre le monde du robot et celui de l'humain.

4.4 De la suite dans les idées

4.4.1 Nouveau paradigme expérimental pour étudier l'interaction sociale chez l'homme

Muir et al. ont développé un nouveau protocole pour étudier l'interaction au cours du développement humain. Ce protocole est basé sur l'utilisation de ce qu'ils appellent un «adulte virtuel», le VIA («Virtuel Adult») [Muir, 2005]. Ce VIA consiste en un corpus de courts extraits vidéos d'une mère s'adressant à son enfant, qui sont sélectionnés en direct par un expérimentateur caché et présentés à un enfant pour interagir avec lui.

A priori, interagir avec le VIA ne constitue pas de l'interaction sociale : il s'agit clairement d'interaction à base de routines. Si nous laissons à Muir et al. le bénéfice du doute, le VIA serait séduisant pour les études des différentes échelles de temps de l'interaction que nous suggérons dans la mesure où il permettrait de manipuler les dites échelles de temps chaque séquence d'interaction étant pré-enregistrée. Il serait donc possible de mesurer un effet sur l'interaction en suivant un protocole en trois épisodes similaire à celui de la *double-vidéo* mais en réduisant encore l'écart entre l'interaction en direct et l'interaction manipulée techniquement, en proposant par exemple, au lieu du différé un adulte toujours interactif mais ayant uniquement changé de rythme d'interaction. Tout ceci sans avoir les modifications du comportement que l'on peut observer sur un humain auquel on demande de modifier en direct son rythme d'interaction.

Le VIA serait donc séduisant, mais si l'on se fie à nos expériences, notamment aux résultats concernant la nécessaire *alternance phatique* au cours d'une seule et même action, alors dans la mesure où chacune des séquences d'interaction du VIA est pré-enregistrée, nous mettons en doute sa validité pour l'étude de l'interaction sociale.

Muir et ses collègues ont tâché de valider le VIA en montrant qu'il permet de reproduire deux effets : l'effet lié au *visage impassible* («still-face effect»), et l'effet lié à l'*inversion de visage* («inverted face effect»). Si leurs résultats permettent bien de conclure que le VIA permet de reproduire ces deux effets [Muir, 2005], on pourra cependant opposer que ces deux effets ne sont pas caractéristiques de la dynamique de l'interaction. Dans le premier cas, le *visage impassible* est par définition un visage immobile, pour lequel la préférence pour les objets en mouvement des mammifères suffit à expliquer le désintérêt. Dans le second cas, la préférence pour les visages à l'endroit de l'humain plutôt que pour les visages inversés peut être suffisante pour expliquer l'effet. Nous ne pouvons donc ici estimer le VIA comme capable de mettre en place une interaction sociale avec le bébé au sens de l'interaction testée par la double-vidéo (i.e. une interaction avec mise en place de synchronie entre les partenaires). Le VIA s'apparente donc plutôt à un test de la perception sociale plutôt que de l'interaction sociale.

Parmi les différentes échelles de temps de l'interaction (par ordre croissant de durée : celle de l'échange phatique, celle de l'action, celle de la relation...) les routines de l'*adulte virtuel* se situent dans l'échelle de temps de l'action. En effet, à une action du bébé, l'*adulte virtuel* répond par une action. Si contre toute attente, le VIA s'avérait comme permettant l'interaction sociale, alors nous pouvons nous poser la question de la nécessité

de l'échelle de temps de l'échange phatique.

En fait nous mettons en doute la capacité du VIA à reproduire l'effet de la *double-vidéo* mais dans la mesure où le VIA reproduit déjà les effets du *visage impassible* et de l'*inversion de visage*, il serait nécessaire de le tester sur la *double-vidéo*, d'abord pour le valider mais aussi afin de l'utiliser en lieu et place du *différé* de la double-vidéo : plutôt que du *différé*, nous aurions de l'interaction à base de routines. Nous pourrions ainsi montrer que l'interaction à base de routines ne fonctionne pas.

4.4.2 Un peu d'apprentissage pour alimenter la communication

L'*imitation*, est un outil performant pour communiquer. Mais pour qu'une communication soit effective, c'est-à-dire pour qu'elle puisse engendrer de la nouveauté chez les différents interlocuteurs, elle doit laisser des traces sur ces interlocuteurs. Ainsi, s'il est nécessaire que au moment de l'interaction elle-même les interlocuteurs entrent dans des dynamiques nouvelles pour les deux, qu'ils partagent ces dynamiques (qu'ils constituent un monde commun au moyen d'une action conjuguée), il est aussi important que chacun des agents soit changé durablement par les dynamiques qu'il a rencontrées : c'est ce qui pourrait différencier la *communication* de la simple *interaction*.

L'idée n'est pas ici de construire une dyade en interaction dont les agents apprennent de nouvelles séquences d'actions ou de nouveaux gestes complexes, mais plutôt que le fait qu'une action ayant une certaine dynamique émerge de l'interaction permette de rendre saillante cette dynamique au sein de chacun des partenaires de l'interaction. Il s'agirait de montrer que les actions dans leur grande diversité peuvent présenter des dynamiques différentes exclusives (plus ou moins) les unes des autres. C'est-à-dire que si je rencontre une certaine dynamique alors il n'y a qu'un certain type de solutions motrices qui y correspondent dans mon corps, suffisamment restreint pour que si j'utilise ces solutions motrices je semble imiter. Ceci serait en accord avec le fait que le nouveau-né imite, avec le fait que le bébé est limité dans son répertoire moteur et avec le fait que l'utilisation d'objet dans l'imitation permet de circonscrire le nombre d'actions possibles.

Il n'est ici certainement pas question de coder le mouvement en positions dans le champ visuel mais uniquement sous forme de séquence temporelle. Si il le faut, les effecteurs doivent être choisis de manière à ce que deux gestes différents correspondent à deux séquences temporelles différentes.

Encore une fois il est nécessaire de développer ensemble le corps, la perception visuelle et la proprioception pour mettre en place un codage unique et univoque.

4.4.3 L'adulte au sein d'une dyade asymétrique

Les dyades mère-enfant et robot-humain sont toutes deux asymétriques : l'humain adulte y est l'expert en interaction capable d'initier et prolonger l'interaction avec le non-expert, bébé ou robot. Dans les études de ces dyades asymétriques, c'est soit sur le bébé (comment fonctionne-t-il?), soit sur le robot (comment le construire?) que l'attention est focalisée. Nous avons vu que pour comprendre le bébé ou le robot il est nécessaire d'étudier leur comportement conjointement avec celui de l'adulte qui interagit avec eux. Mais le comportement de l'adulte dépend lui même du comportement de l'agent avec lequel il constitue une dyade.

L'adulte sait, lorsqu'il interagit avec un bébé ou un robot, que c'est principalement sur lui que repose l'interaction, mais est-il pour autant capable de faire seul l'effort d'interaction ?

Quelles sont alors les caractéristiques dynamiques que doit présenter un agent naïf comme le robot ou le bébé pour que l'expert adulte cherche à prolonger l'interaction avec lui ?

Ainsi, dans quelle mesure la mère est-elle sensible au fait que l'enfant se synchronise avec elle ? L'a priori de la mère quant à l'enfant et à la nécessité de prendre en charge l'interaction, est-il suffisant pour que l'effort de synchronisation puisse n'être qu'unilatéral, produit uniquement par la mère ?

De même avec les enfants ayant de l'autisme, c'est l'adulte qui initie la synchronisation et l'interaction. Comme nous l'avons vu section 2.7, dans un contexte favorisant l'imitation réciproque avec des objets en double exemplaire, c'est en imitant l'enfant avec autisme que l'expérimentateur va initier une interaction sociale qui va déboucher sur de l'imitation réciproque, de la synchronie, des tours de rôle et de l'attention conjointe [Nadel and Butterworth, 1999, Nadel, 2002a, Nadel and Decety, 2002]. Mais si nous observons les vidéos de ces expériences, produire l'effort d'interaction s'avère ne pas se cantonner à imiter l'autre : pour pouvoir produire cet effort il faut la participation de l'enfant avec autisme. En codant le comportement de l'expérimentateur sur ces vidéos, nous pourrions montrer à quel point, peut importe l'asymétrie de la dyade et la connaissance par l'expert du fait que c'est lui qui doit fournir l'effort d'interaction, si le système

non-expert ne participe pas un temps soit peu à l'effort d'interaction, la *communication* est impossible à mettre en place : de la même manière que le non-expert imite moins si l'expert ne l'imite pas, l'expert imite moins lorsqu'il n'est pas imité en retour, et proposer de la nouveauté devient plus difficile. Le couplage entre les systèmes fait émerger la nouveauté facilement là où elle est laborieuse à proposer en l'absence de couplage.

Pour tous ceux qui veulent construire des robots sociaux, nous pourrions alors affirmer que peu importe le corps (humanoïde ou non : l'enfant avec autisme à le meilleur corps qui soit pour un agent interactif), peu importe la biologie du mouvement, si le robot ne s'adapte pas à ce que fait l'humain, par exemple en l'imitant et en proposant des actions à imiter alors l'interaction sera difficile pour l'humain.

4.4.4 Se synchroniser tout en générant de la nouveauté

Si l'on considère deux agents qui comme nos robots, se synchronisent et prennent des tours de rôles, il est nécessaire, pour que l'interaction se prolonge, que les deux agents trouvent une stimulation à interagir : la synchronie parfaite dans les systèmes naturels, s'il est clair qu'elle est source de satisfaction sociale pour les partenaires, ne dure jamais tout le temps de l'interaction mais est plutôt un phénomène transitoire.

Le codage des différentes échelles de temps en jeu dans les interactions mère-enfant que nous avons fait section 2.6.4, à partir des films tirés de la *double-vidéo* de ces périodes de synchronie parfaite entre les interlocuteurs, mérite donc d'être poursuivi, précisé et généralisé à une plus grande population, et notamment aux vidéos d'enfants interagissant entre eux et aux vidéos d'interaction avec des enfants ayant de l'autisme.

De même l'étude des oscillateurs et de la possibilité d'alterner entre synchronie et décalage temporel par exemple en utilisant des oscillateurs chaotiques, constituent-ils une solution et si oui est-elle alors assimilable au comportement humain ?

4.4.5 Le robot qui module son interaction avec l'homme

Pour implémenter une capacité au *tour de rôle* dans une dyade homme-robot, qui soit modulée par la qualité de l'interaction et où le robot puisse avoir une capacité d'apprentissage plusieurs questions se posent. Faut-il modéliser plusieurs échelles de temps ? Pourra-t-on faire interagir l'humain ou doit-on, dans un premier temps, se contenter d'interactions entre robots (partageant tous deux des échelles de temps lentes par rapport à l'interaction humaine) ?

Comme nous l'avons évoqué à la suite de nos expériences, section 2.6.1, le principe de couplage entre système ayant des dynamiques oscillantes doit être généralisé à des robots au comportement plus complexe. Il doit notamment être généralisé à des robots capables d'apprendre les dynamiques émergentes de l'interaction et donc d'être changés durablement par l'interaction.

Enfin, ce principe de couplage entre systèmes dynamiques pour construire la dyade en interaction doit être adapté à la dyade homme-robot. Notamment en utilisant, comme moyen d'influence réciproque, la *synchronie* telle que nous avons montré avec des résultats préliminaires section 4.2 qu'elle a du sens dans l'interaction homme-robot et qu'elle peut être extraite de l'interaction et utilisée par le robot.

4.5 Impénétrables voies de la cognition

Au travers de l'étude de l'émergence de la communication entre agents autonomes, c'est l'étude de l'émergence de la cognition que nous faisons. La communication a l'avantage de nous empêcher de nous dérober face au problème de l'énaction et de nous forcer à prendre en compte la dynamique d'interaction. Le problème est le même lorsque qu'il s'agit d'interagir avec le monde physique, le monde est en changement permanent, changement dû ou non à l'action de l'agent.

Nos résultats induisent plus de complexité dans la manière d'appréhender la communication que les données qui ont engendré ces résultats. En effet nous avons montré que plus qu'apporter une réponse à la question de la dyade en interaction, nous avons proposé une voie pour répondre à cette question, balisée par les principes d'*émergence* et d'*énaction*. Nous avons entamé cette voie en montrant qu'elle passait par des couplages entre systèmes dynamiques et par la nécessaire prise en compte de l'écoulement du temps : entre autres, c'est la mise en jeu d'échelles de temps différentes (comme celles de l'*action* et de l'*échange phatique*) qui permet le partage d'un contexte commun par les partenaires de l'interaction.

Ce début d'une approche de la communication en robotique comme un tout dynamique émergent met en évidence des difficultés principales : D'une part les contraintes liées à la chronométrie de l'interaction, l'interaction doit se faire en direct, en temps réel, que ce soit dans les parties mécaniques du robot ou dans ses parties computationnelles, et c'est à l'heure actuelle un obstacle technologique. D'autre part, se trouve la difficulté

liée au contexte ambiant de recherche en robotique qui reste pour l'heure largement dominé par la construction et l'utilisation de représentations du monde plutôt que par l'utilisation de dynamiques d'interaction émergentes.

Ce qu'il y aura une fois ces obstacles franchis reste à découvrir et à construire : c'est vrai pour la recherche comme ça l'est pour la cognition, pour reprendre une dernière fois les propos de Varela [Varela, 2006], «l'environnement ne contient pas d'attributs, c'est l'histoire, récurrente, cyclique qui fait émerger les attributs du monde. [...] C'est l'image du poème de Machado qui dit qu'il n'y a pas de chemin et que le chemin se fait en marchant (Caminante no hay camino, se camino al andar). ».

Voilà, en espérant qu'en l'absence de couplage dynamique entre nous, vous aurez accepté de faire la totalité de l'effort d'interaction et qu'en dépit de mon impossibilité à modifier mon propos en direct, en fonction de vos réactions, nous nous serons compris et que j'aurai parlé de ce que vous avez écouté.

BIBLIOGRAPHIE

- [Abate et al., 2007] Abate, A. F., Nappi, M., Riccio, D., and Sabatino, G. (2007). 2d and 3d face recognition : A survey. *Pattern Recogn. Lett.*, 28(14) :1885–1906.
- [Adamson and Frick, 2003] Adamson, L. B. and Frick, J. E. (2003). The still face : A history of a shared experimental paradigm. *Infancy*, 4(4) :451–473.
- [Alissandrakis et al., 2003a] Alissandrakis, A., Nehaniv, C. L., and Dautenhahn, K. (2003a). Solving the correspondence problem between dissimilarly embodied robotic arms using the alicia imitation mechanism. In for the Study of Artificial Intelligence, T. S. and of Behaviour, S., editors, *Proceedings of the Second International Symposium on Imitation in Animals and Artifacts*, pages 79–92.
- [Alissandrakis et al., 2003b] Alissandrakis, A., Nehaniv, C. L., and Dautenhahn, K. (2003b). Synchrony and perception in robotic imitation across embodiments. In *IEEE International Symposium on : Computational Intelligence in Robotics and Automation*, volume 2, pages 923–930.
- [Amari, 1977] Amari, S. (1977). Dynamics of pattern formation in lateral-inhibition type neural fields. *Biological Cybernetics*, 27 :77–87.
- [Andry and Gaussier, 2006] Andry, P. and Gaussier, P. (2006). The low-level mechanisms of autonomous and intuitive human-robot interactions. In *International Conference on Robotics Science and Systems, RSS06, Workshop on Intuitive Human-Robot Interactions : “how to get the job done ”*, <http://www.dfki.de/cosy/www/events/intuitive-interaction.rss2006wsh.html>. RSS06, On line proceedings.
- [Andry et al., 2001] Andry, P., Gaussier, P., Moga, S., Banquet, J., and Nadel, J. (2001). Learning and communication in imitation : An autonomous robot perspective. *IEEE transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A*, 31(5) :431–444.
- [Andry et al., 2002a] Andry, P., Gaussier, P., and Nadel, J. (2002a). From sensorimotor coordination to low level imitation. In *Second international workshop on epigenetic robotics, EPIROB 02*, pages 7–15.
- [Andry et al., 2002b] Andry, P., Gaussier, P., and Nadel, J. (2002b). From visuo-motor coordination to imitation : an autonomous robot perspective. In *Workshop on Dynamic Motor representations*, Institut Henri Poincaré, IHP, France. Conférence invitée.

- [Andry et al., 2004] Andry, P., Gaussier, P., Nadel, J., and Hirsbrunner, B. (2004). Learning invariant sensorimotor behaviors : A developmental approach to imitation mechanisms. *Adaptive behavior*, 12(2) :117–138.
- [Andry et al., 2000a] Andry, P., Moga, S., P.Gaussier, Revel, A., and Nadel, J. (2000a). Imitation : learning and communication. In *The Sixth International Conference on Simulation for Adaptive Behavior SAB'2000*, pages 353–362, Paris. MIT Press.
- [Andry et al., 2002c] Andry, P., P.Gaussier, Moga, S., and Nadel, J. (2002c). *Approche dynamique de la cognition artificielle*, chapter Approche neurocybernétique de l'imitation. A. Guillot and E. Daucé, hermes edition.
- [Andry et al., 2000b] Andry, P., P.Gaussier, and Nadel, J. (2000b). Importance of dynamical interactions for social learning. In *Dynamical Neural Networks, DYNN00*, pages 60–62.
- [Andry et al., 2002d] Andry, P., P.Gaussier, and Nadel, J. (2002d). Development of the firsts sensori-motor stages : a contribution to imitation. In Meyer, J. A., Berthoz, A., Floreano, D., Roitblat, H., and Wilson, S., editors, *Seventh International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*.
- [Andry and Revel, 2006] Andry, P. and Revel, A. (2006). Modeling synchrony for perception-action systems coupling. In *International Conference on Epigenetic Robotics, EpiRob06*, volume 128, page 163. Lund University Cognitive Study.
- [Aouka, 2006] Aouka, N. (2006). *Imitation des gestes non significatifs : étude développementale et comparaison dans le cas d'autisme*. PhD thesis, Université René Descartes, Paris, FR.
- [Arnold, 1983] Arnold, V. I. (1983). *Geometrical Methods in the Theory of Ordinary Differential Equations*. Springer, New-York, NY.
- [Atkeson and Schaal, 1997] Atkeson, C. G. and Schaal, S. (1997). robot learning from demonstration. In *machine learning : proceedings of the fourteenth international conference (icml '97)*, pages 12–20. morgan kaufmann.
- [Bahrick, 2000] Bahrick, L. (2000). *Infant development : the essential readings*, chapter Increasing specificity in the development of intermodal perception, pages 119–136. Oxford : Blackwell.
- [Baldwin, 1897] Baldwin, J. M. (1897). *Le développement mental chez l'enfant et dans la race*. Alcan, Paris.
- [Ballard et al., 1997] Ballard, D. H., Hayhoe, M. M., Pook, P. K., and Rao, R. P. N. (1997). Deictic codes for the embodiment of cognition. *Behavioral and Brain Sciences*, 20 :723–767.
- [Bandura, 1971] Bandura, A. (1971). *Psychological modeling conflicting theories*. Chicago : Aldine.
- [Baptista and Kurths, 2005] Baptista, M. S. and Kurths, J. (2005). Chaotic channel. *Physical Review E (Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics)*, 72(4) :045202.

- [Beer, 1995] Beer, R. D. (1995). A dynamical systems perspective on agent-environment interaction. *Artificial Intelligence*, (72) :173–215.
- [Belykh et al., 2004] Belykh, V., G.V.Osipov, Kucklander, N., Blasius, B., and Kurths, J. (2004). Automatic control of phase synchronization in coupled complex oscillators. *Physica D*, 200 :81–104.
- [Bergé et al., 1997] Bergé, F., Pomeau, Y., and Vidal, C. (1997). *L'ordre dans le chaos. Vers une approche déterministe de la turbulence*. Herman, Paris, FR.
- [Berthouze and Goldfield, 2007] Berthouze, L. and Goldfield, E. C. (2007). Développement moteur : la robotique au secours de la psychologie du développement. *Enfance*, 59(1) :18–34.
- [Berthouze et al., 1998] Berthouze, L., Shigematsu, Y., and Kuniyoshi, Y. (1998). Dynamic categorization of explorative behaviors for emergence of stable sensorimotor configuration. In Pfeifer, R., Blumberg, B., Meyer, J., and Winson, S., editors, *Proceeding of the Fifth International Conference of The Society for Adaptive Behaviour 98, SAB 98*, pages 67–72.
- [Berthoz, 1997] Berthoz, A. (1997). *Le sens du mouvement*. Odile Jacob, Paris.
- [Beynon et al., 2005] Beynon, M., Harfield, A., and Chang, S. (2005). Alternative model-building for the study of socially interactive robots. In Intelligence, A. S., Interaction in Animals, R., and Agents, editors, *Proceedings of the Symposium on Robot Companions : Hard Problems and Open Challenges in Robot-Human Interaction*, pages 5–15.
- [Bierre, 1985] Bierre, P. (1985). The professor's challenge. *AI Magazine*, 5(4) :60–70.
- [Bigelow and Birch, 1996] Bigelow, A. and Birch, S. (1996). The effects of contingency in previous interactions on infants' preference for social partners. *Infant Behaviour and Development*, 22 :367–382.
- [Bigelow and DeCoste, 2003] Bigelow, A. and DeCoste, C. (2003). Sensitivity to social contingency from mothers and strangers in 2-4-, and 6-month-old infants. *Infancy*, 4(1) :111–140.
- [Billard, 2003] Billard, A. (2003). Robota : Clever Toy and Educational Tool. *Robotics & Autonomous Systems*, 42 :259–269. Sponsor : Swiss National Science Foundation.
- [Billard and Schaal, 2001] Billard, A. and Schaal, S. (2001). robust learning of arm trajectories through human demonstration. In *iee international conference on intelligent robots and systems (iros 2001)*. piscataway, nj : ieee.
- [Bird and Heyes, 2007] Bird, G. and Heyes, C. (2007). *Imitation and Social Learning in Robots, Humans and Animals*, chapter Imitation : thoughts about theories, pages 23–34. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [Blanchard and Cañamero, 2006] Blanchard, A. and Cañamero, L. (2006). Developing affect-modulated behaviors : Stability, exploration, exploitation or imitation? In *International Conference on Epigenetic Robotics, EpiRob06*, volume 128, pages 17–24.

- [Blanchard and Cañamero, 2007] Blanchard, A. J. and Cañamero, L. (2007). Développement de liens affectifs basés sur le phénomène d’empreinte pour moduler l’exploration et l’imitation d’un robot. *Enfance*, 59(1) :35–45.
- [Blow et al., 2006] Blow, M., Dautenhahn, K., Appleby, A., Nehaniv, C., and Lee, D. (2006). Perception of robot smiles and dimensions for human-robot interaction design. In *The 15th IEEE International Symposium on Publication Robot and Human Interactive Communication*, pages 469–474, Hatfield, UK.
- [Blurton-Jones, 1972] Blurton-Jones, N. (1972). *Ethological studies of child behavior*. Cambridge University Press.
- [Bourgine and Stewart, 2004] Bourginé, P. and Stewart, J. (2004). Autopoiesis and cognition. *Artif. Life*, 10(3) :327–345.
- [Breazeal, 2002] Breazeal, C. (2002). *Designing Sociable Robots*. MIT Press, Cambridge, MA.
- [Breazeal, 2003] Breazeal, C. (2003). Towards sociable robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 42 :167–175.
- [Breazeal et al., 2005] Breazeal, C., Buchsbaum, D., Gray, J., Gatenby, D., and Blumberg, B. (2005). Learning from and about others : Towards using imitation to bootstrap the social understanding of others by robots. *Artif. Life*, 11(1-2) :31–62.
- [Breazeal and Scassellati, 1999] Breazeal, C. and Scassellati, B. (1999). A context-dependent attention system for a social robot. In *Sixteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence : IJCAI99*, pages 1146–1151, Stockholm, Sweden.
- [Brooks, 1991] Brooks, R. A. (1991). Intelligence without reason. In Myopoulos, J. and Reiter, R., editors, *Proceedings of the 12th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-91)*, pages 569–595, Sydney, Australia. Morgan Kaufmann publishers Inc. : San Mateo, CA, USA.
- [Bugmann, 2005] Bugmann, G. (2005). Effective spoken interfaces to service robots : Open problems. In Dautenhahn, K., editor, *AISB’05 : Social Intelligence and Interaction in Animals, Robots and Agents*, pages 18–22, Hatfield, UK. AISB.
- [Burnham, 1994] Burnham, D. (1994). Visual recognition of mother by young infants : facilitation by speech. *Perception*, 22 :1133–1153.
- [Byrne and Russon, 1998] Byrne, R. and Russon, A. (1998). Learning by imitation : a hierarchical approach. *Behavioral and Brain Science*, 21 :667–721.
- [Cañamero, 2002] Cañamero, L. D. (2002). *Playing the emotion game with Felix : what can a LEGO robot tell us about emotion ?*, chapter 8, pages 69–76. Norwell, MA : Kluwer Academic Publishers.
- [Cañamero and Gaussier, 2005] Cañamero, L. D. and Gaussier, P. (2005). *Emotion understanding : robot as tools and models*, chapter 9, pages 235–258. UK : Oxford University Press.

- [Casper and Fifer, 1980] Casper, A. D. and Fifer, W. (1980). Of human bonding : newborns prefer their mother's voices. *Science*, 208 :1174–1176.
- [Chevallier et al., 2005] Chevallier, S., Paugam-Moisy, H., and Lemaître, F. (2005). Distributed processing for modelling real-time multimodal perception in a virtual robot. In *Proc. of 23rd IASTED International Conference on Parallel and Distributed Computing and Networks*, pages 393–398, Innsbruck, AUSTRIA. ACTA Press.
- [Cliff, 1990] Cliff, D. (1990). Computational neuroethology : a provisional manifesto. In *Proceedings of the first international conference on simulation of adaptive behavior on From animals to animats*, pages 29–39, Cambridge, MA, USA. MIT Press.
- [Condon, 1976] Condon, W. S. (1976). An analysis of behavioral organisation. *Sign Language Studies*, 13 :285–318.
- [Cooper et al., 1995] Cooper, A., Chairman, and Founder (1995). The myth of metaphor. *Visual Basic Programmer's Journal*.
- [Cosnier and Brossard, 1984] Cosnier, J. and Brossard, A. (1984). *La communication non verbale*, chapter Communication non verbale : co-texte ou contexte?, pages 1–30. Delachaux et Niestlé, Paris, Fr.
- [Cuperlier et al., 2006] Cuperlier, N., Quoy, M., and Gaussier, P. (2006). Navigation and planning in an unknown environment using vision and a cognitive map. In *Proc. of European robotic Symposium 2006*, pages 129–142, Palerme.
- [Dautenhahn, 1995] Dautenhahn, K. (1995). Getting to know each other - artificial social intelligence for autonomous robots. *Robotics and Autonomous System*, 16(2-4) :333–356.
- [Dautenhahn and Billard, 1999] Dautenhahn, K. and Billard, A. (1999). Bringing up robots or the psychology of socially intelligent robots : From theory to implementation. In *Autonomous Agents*.
- [Dautenhahn et al., 2002] Dautenhahn, K., Ogden, B., and Quick, T. (2002). From embodied to socially embedded agents - implications for interaction-aware robots. *Cognitive Systems Research*, 3 :397–428.
- [Dautenhahn and Werry, 2004] Dautenhahn, K. and Werry, I. (2004). Towards interactive robots in autism therapy : Background, motivation and challenges. *Pragmatics and Cognition*, 12(1) :1–35.
- [de Boysson-Bardies, 1996] de Boysson-Bardies, B. (1996). *Comment la parole vient aux enfants*. Editions Odile Jacob, Paris, Fr.
- [Dearden and Demiris, 2005] Dearden, A. and Demiris, Y. (2005). Learning forward models for robotics. In *IJCAI-2005*, pages 1440–1445, Edinburgh, UK.
- [Dearden and Demiris, 2007] Dearden, A. and Demiris, Y. (2007). From exploration to imitation : using learnt internal models to imitate others. In *AISB-2007*, pages 218–226.

- [Demiris and Hayes, 1996] Demiris, J. and Hayes, G. (1996). Imitative learning mechanisms in robots and humans. In Klingspor, V., editor, *5th European Workshop on Learning Robots*, Bari, Italy.
- [Demiris, 2002] Demiris, Y. (2002). Imitation, mirror neurons, and the learning of movement sequences. In *International Conference on Neural Information Processing (ICONIP-2002)*, pages 111–115, Singapore.
- [Dodd, 1979] Dodd, B. (1979). Lip reading in infants : attention to speech. *Canadian Psychologist*, 11 :478–484.
- [Edelman, 1987] Edelman, G. (1987). *Neural Darwinism : The Theory of Neuronal Group Selection*. Basic Books, New York.
- [Edelman, 1992] Edelman, G. M. (1992). *Biologie de la conscience*. Editions Odile Jacob, Paris.
- [Edelman, 2004] Edelman, G. M. (2004). *Plus vaste que le ciel. Une nouvelle théorie générale du cerveau*. Odile Jacob Sciences, Paris.
- [Fell et al., 1994] Fell, H., Delta, H., Peterson, R., Ferrier, L., Mooraj, Z., and Valleau, M. (1994). Using the babybabble-blanket for infants with motor problems. In *Proceedings of the Conference on Assistive Technologies (ASSETS'94)*, pages 77–84, Marina del Rey, CA.
- [Ferrari et al., 2006] Ferrari, P., Visalberghi, E., Paukner, A., Fogassi, L., Ruggiero, A., and Suomi, S. J. (2006). Neonatal imitation in rhesus macaques. *PLoS Biology*, 4(9) :e302.
- [Fivaz-Depeursinge and Corboz-Warnery, 1999] Fivaz-Depeursinge, E. and Corboz-Warnery, A. (1999). *The primary triangle : A developmental system view of mothers, fathers and infants*. Plenum Press : NY.
- [Fong et al., 2003] Fong, T., Nourbakhsh, I., and Dautenhahn, K. (2003). A survey of socially interactive robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 42 :143–166.
- [Franceschini, 2004] Franceschini, N. (2004). Visual guidance based on optic flow : a biorobotic approach. *Journal of Physiology-Paris*, 98 :281–292.
- [Franceschini et al., 2007] Franceschini, N., Ruffier, F., and Serres, J. (2007). A bio-inspired flying robot sheds light on insect piloting abilities. *Current Biology*, 17 :329–335.
- [Gaussier, 2001] Gaussier, P. (2001). Toward a cognitive system algebra : A perception/action perspective. In *European Workshop on Learning Robots (EWLR)*, pages 88–100, http://www-etis.ensea.fr/~neurocyber/EWRL2001_gaussier.pdf.
- [Gaussier et al., 2004] Gaussier, P., Baccon, J., Prepin, K., Nadel, J., and Hafemeister, L. (2004). Formalization of recognition, affordances and learning in isolated or interacting animats. In *The Society for Adaptive Behavior SAB'04*, MIT Press, Los Angeles, CA, USA.
- [Gaussier et al., 1997] Gaussier, P., Joulain, C., Moga, S., Quoy, M., and Revel, A. (1997). Autonomous robot learning : What can we take for free? In *To appear in International Symposium on Industrial Electronics - ISIE'97*, pages SS1–SS6, Guimarães, Portugal. IEEE.

- [Gaussier et al., 1998] Gaussier, P., Moga, S., Quoy, M., and Banquet, J. (1998). From perception-action loops to imitation processes : a bottom-up approach of learning by imitation. *Applied Artificial Intelligence*, 12(7-8) :701–727.
- [Gaussier et al., 2003] Gaussier, P., Prepin, K., and Nadel, J. (2003). Toward a cognitive system algebra : Application to facial expression learning and imitation. In *Embodied Artificial Intelligence*, pages 243–258.
- [Gaussier and Zrehen, 1995a] Gaussier, P. and Zrehen, S. (1995a). Avoiding the world model trap : An acting robot does not need to be so smart ! *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, 11(4) :279–286.
- [Gaussier and Zrehen, 1995b] Gaussier, P. and Zrehen, S. (1995b). Perac : A neural architecture to control artificial animals. *Robotics and Autonomous System*, 16(2-4) :291–320.
- [Gergely and Csibra, 2005] Gergely, G. and Csibra, G. (2005). The social construction of the cultural mind : Imitative learning as a mechanism of human pedagogy. *Making Minds II : Special issue of Interaction Studies*, 6 :3 :463–481.
- [Giovannangeli et al., 2006] Giovannangeli, C., , Gaussier, P., G., and Désilles (2006). Robust mapless outdoor vision-based navigation. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and systems*, Beijing, China. IEEE.
- [Glenberg and Robertson, 2000] Glenberg, A. M. and Robertson, D. A. (2000). Symbol grounding and meaning : A comparison of high-dimensional and embodied theories of meaning. *Journal of Memory and Language*, 43 :379–401.
- [Guillaume, 1925] Guillaume, P. (1925). *L'imitation chez l'enfant*. Alcan, Paris.
- [Hains and Muir, 1996] Hains, S. and Muir, D. (1996). Effects of stimulus contingency in infant-adult interactions. *Infant behavior and development*, 19 :49–61.
- [Harnad, 1990] Harnad, S. (1990). The symbol grounding problem. *Physica D*, 42 :335–346.
- [Hauptmann, 1989] Hauptmann, A. G. (1989). Speech and gestures for graphic image manipulation. In *Proceedings of the Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'89)*, pages 241–245, New-York, NY. ACM Press.
- [Ho et al., 2002] Ho, M.-C., Hung, Y.-C., and Chou, C.-H. (2002). Phase and anti-phase synchronization of two chaotic systems by using active control. *Physics letters A*, 296 :43–48.
- [Holzman, 1999] Holzman, T. G. (1999). Computer-human interface solutions for emergency medical care. *Interactions*, 6(3) :13–24.
- [Hosoda et al., 2004] Hosoda, K., Sumioka, H., Morita, A., and Asada, M. (2004). Acquisition of human-robot joint attention through real-time natural interaction. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, volume 3, pages pp.2867–2872. IEEE/RSJ.
- [Huygens, 1669] Huygens, C. (1669). Instructions concerning the use of pendulum-watches for finding the longitude at sea. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 4 :937.

- [Iida and Pfeifer, 2004] Iida, F. and Pfeifer, R. (2004). “cheap” rapid locomotion of a quadruped robot : Self-stabilization of bounding gait. In et al., F. G., editor, *Intelligent Autonomous Systems*, volume 8, pages 642–649. IOS Press.
- [Ikegami, 1993] Ikegami, T. (1993). Ecology of evolutionary game strategies. In *ECAL 93*, pages 527–536.
- [Johnson, 1987] Johnson, M. (1987). *The body in the mind : The bodily basis of meaning, imagination, and reason*. Chicago University Press, Chicago, IL.
- [Johnson, 2006] Johnson, M. J. (2006). Recent trends in robot-assisted therapy environments to improve real-life functional performance after stroke. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 3(1) :29–35.
- [Kanda and Ishiguro, 2005] Kanda, T. and Ishiguro, H. (2005). Communication robots for elementary schools. In Dautenhahn, K., editor, *AISB’05 : Social Intelligence and Interaction in Animals, Robots and Agents*, pages 54–63, Hatfield, UK. AISB.
- [Kandel et al., 2000] Kandel, E. R., Schwarz, J. H., and Jessel, T. M. (2000). *Principles of Neural Science*. McGraw-Hill, 4. edition.
- [Kaplan and Oudeyer, 2007] Kaplan, F. and Oudeyer, P.-Y. (2007). Un robot motivé pour apprendre : Le rôle des motivations intrinsèques dans le développement sensorimoteur. *Enfance*, 59(1) :46–58.
- [Kelso, 1995] Kelso, J. S. (1995). *Dynamic patterns : the self-organization of brain and behavior*. MIT Press.
- [Köhler, 1925] Köhler, W. (1925). *The mentality of apes*. Routledge and Kegan Paul, London, UK.
- [Kim et al., 2003] Kim, C.-M., Rim, S., Kyen, W.-H., Ryu, J.-W., and Park, Y.-J. (2003). Anti-synchronization of chaotic oscillators. *PHYSICS LETTERS A*, 320 :39–46.
- [Kozima and Nakagawa, 2007] Kozima, H. and Nakagawa, C. (2007). Interactive robots as facilitators of children’s social development. In Lazinica, A., editor, *Mobile Robots : Towards New Applications. Advanced Robotic Systems*, pages 269–286, Vienna.
- [Kozima et al., 2003] Kozima, H., Nakagawa, C., and Yano, H. (2003). Attention coupling as a prerequisite for social interaction. In *2th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, pages 109–114. IEEE, IEEE Press.
- [Kozima et al., 2005] Kozima, H., Nakagawa, C., and Yasuda, Y. (2005). Designing and observing human-robot interactions for the study of social development and its disorders. In *6th IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, CIRIA 2005*. IEEE, IEEE Press.
- [Kuhl and Meltzoff, 1982] Kuhl, P. and Meltzoff, A. (1982). The bimodal perception of speech in infancy. *Science*, 218 :1138–1141.

- [Kuniyoshi, 1994] Kuniyoshi, Y. (1994). The science of imitation - towards physically and socially grounded intelligence -. Special Issue TR-94001, Real World Computing Project Joint Symposium, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken.
- [Lau and Triesch, 2004] Lau, B. and Triesch, J. (2004). Learning gaze following in space : a computational model. In *3rd International Conference for Development and Learning : ICDL'04*, pages 20–22, La Jolla, California, USA.
- [Maillard, 2007] Maillard, M. (2007). *Formalisation de la perception comme dynamique sensori-motrice : application dans un cadre de reconnaissance d'objets par un robot autonome*. PhD thesis, Université de Cergy-Pontoise, ETIS lab., Cergy-Pontoise, France.
- [Maillard et al., 2005] Maillard, M., Gapenne, O., Hafemeister, L., and Gaussier, P. (2005). Perception as a dynamical sensori-motor attraction basin. In Springer-Verlag, editor, *Lecture Notes in Artificial Intelligence - VIIIth European Conference on Artificial Life ECAL05*, page in press, Canterbury.
- [Maillard et al., 2006] Maillard, M., Hafemeister, L., and Gaussier, P. (2006). Une approche dynamique des mécanismes perceptifs. In *Neurocomp06*, volume 1, pages 214–217, Pont a mousson, France. F. Alexandre et al.
- [Marti et al., 2005] Marti, P., Palma, V., Pollini, A., and Rullo, A. (2005). My gym robot. In Dautenhahn, K., editor, *AISB'05 : Social Intelligence and Interaction in Animals, Robots and Agents*, pages 64–73, Hatfield, UK. AISB.
- [Mataruna and Varela, 1980] Mataruna, H. and Varela, F. (1980). *Autopoiesis and Cognition : the realization of the living*. Reidel, Dordrecht.
- [M.Bennett et al., 2002] M.Bennett, M.F.Schatz, H.Rockwood, and K.Wiesenfeld (2002). Huygen's clocks. *Proc. R. Soc. Lond.*, 458 :563–579.
- [Meltzoff and Moore, 1977] Meltzoff, A. and Moore, M. K. (1977). Imitation of facial and manual gestures by humans neonates. *Science*, 198(4312) :74–78.
- [Merlau-Ponty, 1945] Merlau-Ponty, M. (1945). *Phénoménologie de la perception*. Gallimard, Bibliothèque des idées.
- [Mertan et al., 1993] Mertan, B., Nadel, J., and Leveau, H. (1993). *New perspective in early communicative development*, chapter The effect of adult presence on communicative behaviour among toddlers. Routledge, London, UK.
- [Moga and Gaussier, 1999] Moga, S. and Gaussier, P. (1999). A neuronal structure for learning by imitation. In Floreano, D., Nicoud, J.-D., and Mondada, F., editors, *Lecture Notes in Artificial Intelligence - European Conference on Artificial Life ECAL99*, pages 314–318, Lausanne.
- [Morita et al., 2004] Morita, A., Yoshikawa, Y., Hosoda, K., and Asada, M. (2004). Joint attention with strangers based on generalization through joint attention with caregivers. In

- International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2004)*, volume 4, pages 3744–3749. IEEE/RSJ.
- [Muir, 2004] Muir, D. (2004). *Emotional development*, chapter Infant perception and production of emotions during face-to-face interactions with live and 'virtual' adults, pages 207–233. Oxford University Press, Oxford, UK.
- [Muir, 2005] Muir, D. (2005). *Emotional development*, chapter Infant perception and production of emotions during face-to-face interactions with live and 'virtual' adults, pages 207–233. Oxford University Press, Oxford, UK.
- [Muir and Hains, 1999] Muir, D. and Hains, S. (1999). *Early social cognition : Understanding others in the first months of life*, chapter Young infants' perception of adult intentionality : Adult contingency and eye direction, pages 155–184. Erlbaum, Mahwah, NJ.
- [Muir and Nadel, 1998] Muir, D. and Nadel, J. (1998). *Perceptual development : Visual, auditory, and speech perception in infancy*, chapter Infant social perception, pages 247–285. Psychology Press, London, UK.
- [Murray and Trevarthen, 1985] Murray, L. and Trevarthen, C. (1985). Emotional regulation of interactions between two-month-olds and their mothers. *Social perception in infants*, pages 101–125.
- [Nadel, 1986] Nadel, J. (1986). *Imitation et communication entre jeunes enfants*. Presse Universitaire de France, Paris.
- [Nadel, 2000] Nadel, J. (2000). The functional use of imitation in preverbal infants and nonverbal children with autism. In A.Meltzoff and Prinz, W., editors, *The Imitative Mind : Development, Evolution and Brain Bases*. Cambridge : Cambridge University Press.
- [Nadel, 2002a] Nadel, J. (2002a). *Imitation and imitation recognition : their functional role in preverbal infants and nonverbal children with autism*, pages 42–62. UK : Cambridge University Press.
- [Nadel, 2002b] Nadel, J. (2002b). When do infants expect? *Infant Behavior and Development*, 25 :30–33.
- [Nadel, 2006] Nadel, J. (2006). *Imitation and the Social Mind*, chapter Does imitation matter to children with autism? The Guilford Press, New York, NY.
- [Nadel and Aouka, 2006] Nadel, J. and Aouka, N. (2006). *Social and Communicative*, chapter Imitation. Some Cues for Intervention Approaches in Autism Spectrum Disorders. The Guilford Press, New York, NY.
- [Nadel and Butterworth, 1999] Nadel, J. and Butterworth, G. (1999). *Imitation in infancy*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [Nadel and Camaioni, 1993] Nadel, J. and Camaioni, L. (1993). *New Perspectives in Early Communicative Development*. Routledge, London, New-York.

- [Nadel et al., 1999a] Nadel, J., Carchon, I., Kervella, C., Marcelli, D., and Rsbat-Plantey, D. (1999a). Expectancies for social contingency in 2-month-olds. *Developmental Science*, 2(2) :164–173.
- [Nadel and Decety, 2002] Nadel, J. and Decety, J. (2002). *Imiter pour découvrir l'humain : psychologie, neurobiologie, robotique et philosophie de l'esprit*. PUF, Paris, France.
- [Nadel et al., 1999b] Nadel, J., Guerini, C., Peze, A., and Rivet, C. (1999b). The evolving nature of imitation as a format for communication. In Nadel, J. Butterworth, G., editor, *Imitation in Infancy*, pages 209–234. Cambridge : Cambridge University Press.
- [Nadel et al., 2005] Nadel, J., Prepin, K., and Okanda, M. (2005). Experiencing contingency and agency : first step toward self-understanding? In Hauf, P., editor, *Making Minds II : Special issue of Interaction Studies 6 :3 2005*, pages 447–462. John Benjamins publishing company.
- [Nadel et al., 2004] Nadel, J., Revel, A., Andry, P., and Gaussier, P. (2004). Toward communication : first imitations in infants, low-functioning children with autism and robots. *Interaction Studies*, 5 :45–75.
- [Nadel and Tremblay-Leveau, 1999] Nadel, J. and Tremblay-Leveau, H. (1999). *Early social cognition*, chapter Early perception of social contingencies and interpersonal intentionality : dyadic and triadic paradigms, pages 189–212. Lawrence Erlbaum Associates.
- [Nagai, 2005a] Nagai, Y. (2005a). Joint attention development in infant-like robot based on head movement imitation. In AISB, editor, *Third International Symposium on Imitation in Animals and Artifacts : AISB'05*, pages 87–96.
- [Nagai, 2005b] Nagai, Y. (2005b). Self-other motion equivalence learning for head movement imitation. In IEEE, editor, *The fourth IEEE International Conference on Development and Learning (ICDL'05)*, page 127.
- [Nagai et al., 2003] Nagai, Y., Hosoda, K., Morita, A., and Asada, M. (2003). A constructive model for the development of joint attention. *Connection Science*, 15 :211–229.
- [Nehaniv and Dautenhahn, 2002] Nehaniv, C. L. and Dautenhahn, K. (2002). *Imitation in Animals and Artifacts*, chapter The Correspondance Problem. MIT Press.
- [Oudin et al., 2007] Oudin, N., Revel, A., and Nadel, J. (2007). Quand une machine facilite l'écriture d'enfant non verbaux avec autisme. *Enfance*, 59(1) :82–92.
- [Oviatt, 1997] Oviatt, S. (1997). Multimodal interactive maps : Designing for human performance. *Human-Computer Interaction [Special issue on Multimodal Interfases]*, 12 :93–129.
- [Oviatt, 2000] Oviatt, S. (2000). Multimodal signal processing in naturalistic noisy environments. In Yuan, B., Huang, T., and Tang, X., editors, *Proceedings of the International Conference on Spoken Language Processing (ICSLP'2000)*, volume 2, pages 696–699, Beijing, China. Chinese Friendship Publishers.

- [Oviatt, 2002] Oviatt, S. (2002). *Handbook of Human-Computer Interaction*, chapter Multimodal Interfaces, page IV.A.14. Laurence Erlbaum, Mahwah, NJ.
- [Paolo, 2003] Paolo, E. A. D. (2003). Organismically-inspired robotics : homeostatic adaptation and teleology beyond the closed sensorimotor loop. In de Technologie de Compiegne, U., editor, *Proceedings of the Erasmus Seminar Espaces d'action, espaces de perception*.
- [Paraskevopoulos and Hunt, 1971] Paraskevopoulos, I. and Hunt, J. M. V. (1971). Object construction and imitation under differing conditions of rearing. *Journal of Genetic Psychology*, 119 :301–321.
- [Pecora and Carroll, 1990] Pecora, L. M. and Carroll, T. L. (1990). Synchronization in chaotic systems. *Phys. Rev. Lett.*, 64(8) :821–824.
- [Pfeifer, 1999] Pfeifer, R. (1999). Dynamics, morphology, and materials in the emergence of cognition. In *KI '99 : Proceedings of the 23rd Annual German Conference on Artificial Intelligence*, pages 27–44, London, UK. Springer-Verlag.
- [Pfeifer and Scheier, 1999] Pfeifer, R. and Scheier, C. (1999). *Understanding intelligence*. MIT press, Cambridge, MA.
- [Piaget, 1945] Piaget, J. (1945). *La formation du symbole chez l'enfant*. Delachaux et Niestle Editions, Geneve. english translation : Play, Dreams and imitation in childhood (1952).
- [Piaget, 1962] Piaget, J. (1962). Le rôle de l'imitation dans la formation de la représentation. *L'évolution psychiatrique*, XXVII(1) :141–150.
- [Pikovsky et al., 1981] Pikovsky, A., Kurths, J., and Rosenblum, M. (1981). *Synchronization : A Universal Concept in Nonlinear Sciences*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [Pratihar, 2003] Pratihar, D. K. (2003). Evolutionary robotics - a review. *Sādhana*, 28(6) :999–1009.
- [Prepin et al., 2006] Prepin, K., Simon, M., Mahé, A.-S., Revel, A., and Nadel, J. (2006). Modelling and testing the effects of a maternal mismatch of face and voice on 6-month-olds? In *International Conference on Epigenetic Robotics, EpiRob06*, volume 128, pages 143–152.
- [Quoy et al., 1997] Quoy, M., Gallet, O., and Gaussier, P. (1997). Implémentation parallèle d'un système de focalisation de l'attention. In *Actes du GRETSI'97*, pages 1205–1208, Grenoble, France.
- [Revel, 1997] Revel, A. (1997). *Contrôle d'un robot mobile autonome par approche neuro-mimétique*. Doctorat de traitement de l'image et du signal, Université de Cergy-Pontoise.
- [Revel and Nadel, 2007] Revel, A. and Nadel, J. (2007). *Imitation and Social Learning in Robots, Humans and Animals : Behavioural, Social and Communicative Dimensions.*, chapter How to build an imitator? Cambridge University Press.
- [Rizzolatti and Craighero, 2004] Rizzolatti, G. and Craighero, L. (2004). The mirror-neuron system. *Annual Review of Neuroscience.*, 27 :169–192.

- [Robins and Dautenhahn, 2007] Robins, B. and Dautenhahn, K. (2007). Encouraging social interaction skills in children with autism playing with robots. a case study evaluation of triadic interactions involving children with autism, other people (peers and adults) and a robotic toy. *Enfance*, 59(1) :72–81.
- [Robins et al., 2005a] Robins, B., Dautenhahn, K., Boekhorst, T., and Billard, A. (2005a). Robotic assistants in therapy and education of children with autism : can a small humanoid robot help encourage social interaction skills? *Univers. Access Inf. Soc.*, 4(2) :105–120.
- [Robins et al., 2005b] Robins, B., Dautenhahn, K., and Dubowski, J. (2005b). Robots as isolators or mediators for children with autism? a cautionary tale. In Dautenhahn, K., editor, *AISB'05 : Social Intelligence and Interaction in Animals, Robots and Agents*, pages 82–88, Hatfield, UK. AISB.
- [Rochat et al., 1998] Rochat, P., Neisser, U., and Marian, V. (1998). Are young infants sensitive to interpersonal contingency? *Infant Behavior and Development*, 21(2) :355–366.
- [Rogers and Williams, 2006] Rogers, S. J. and Williams, J. H. G. (2006). *Imitation and the Social Mind*. The Guilford Press, New York, NY.
- [Rosenblum et al., 1996] Rosenblum, M. G., Pikovsky, A. S., and Kurths, J. (1996). Phase synchronization of chaotic oscillators. *Phys. Rev. Lett.*, 76(11) :1804–1807.
- [Rosenblum et al., 1997] Rosenblum, M. G., Pikovsky, A. S., and Kurths, J. (1997). From phase to lag synchronization in coupled chaotic oscillators. *Phys. Rev. Lett.*, 78(22) :4193–4196.
- [Rumelhart et al., 1989] Rumelhart, D., McClelland, J., and Group, T. P. R. (1989). *Parallel Distributed Processing*. MIT Press, Cambridge.
- [Saunders et al., 2006] Saunders, J., Nehaniv, C. L., and Dautenhahn, K. (2006). Teaching robots by moulding behavior and scaffolding the environment. In *HRI '06 : Proceeding of the 1st ACM SIGCHI/SIGART conference on Human-robot interaction*, pages 118–125, New York, NY, USA. ACM Press.
- [Saunders et al., 2007] Saunders, J., Nehaniv, C. L., Dautenhahn, K., and Alissandrakis, A. (2007). Self-imitation and environmental scaffolding for robot teaching. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 4(1) :109–124.
- [Sauser and Billard, 2006] Sauser, E. L. and Billard, A. G. (2006). Biologically inspired multi-modal integration : Interferences in a human-robot interaction game. In *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 5619–5624, Beijing, China.
- [Scassellati, 2005a] Scassellati, B. (2005a). How social robots will help us to diagnose, treat, and understand autism. In *12 th International Symposium of Robotics Research (ISRR)*, San Francisco, CA.
- [Scassellati, 2005b] Scassellati, B. (2005b). Quantitative metrics of social response for autism diagnosis. In *14th International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, ROMAN 2005.*, pages 585–590, Nashville, TN. IEEE.

- [Schaal, 1997] Schaal, S. (1997). Learning from demonstration. In *advances in neural information processing systems 9*, pages 1040–1046. mit press.
- [Schaal, 1999] Schaal, S. (1999). is imitation learning the route to humanoid robots? 6 :233–242.
- [Schaal et al., 2003] Schaal, S., Ijspeert, A., and Billard, A. (2003). Computational approaches to motor learning by imitation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 1431(358) :537–547.
- [Schaal et al., 2004] Schaal, S., Ijspeert, A., and Billard, A. (2004). *computational approaches to motor learning by imitation*, pages 199–218. Number 1431. oxford university press.
- [Scheeff et al., 2000] Scheeff, M., Pinto, J., Rahardja, K., Snibbe, S., and Tow, R. (2000). Experiences with sparky : A social robot. In *Proceedings of the Workshop on Interactive Robot Entertainment, WIRE-2000*.
- [Schefflen, 1982] Schefflen, A. (1982). *Interaction Rhythms : Periodicity in Communicative Behavior*, chapter Comments on the significance of interaction rhythms. Human Sciences Press, New York, NY.
- [Scherer, 1980] Scherer, K. R. (1980). *The social and psychological contextes of language*, chapter The functions of non verbal signs in conversation. Hillsdale and N.J. and Erlbaum.
- [Schöner and Thelen, 2006] Schöner, G. and Thelen, E. (2006). Using dynamic field theory to rethink infant habituation. *Psychological Review*, 113(2) :273–299.
- [Shannon, 1948] Shannon, C. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27 :623–656.
- [Sim et al., 2003] Sim, S. K., Ong, K. W., and Seet, G. (2003). A foundation for robot learning. *Proceedings of the 4th International Conference on Control and Automation, ICCA '03*, pages 649–653.
- [Simon, 2007] Simon, M. (2007). *L'enfance face à des expressions robotiques et humaines : étude développementale et comparative dans le cas d'autisme*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.
- [Simon et al., 2007] Simon, M., Canet, P., Soussignan, R., Gaussier, P., and Nadel, J. (2007). L'enfant face à des expressions robotiques et humaines. *Enfance*, 59(1) :59–71.
- [Smith and Thelen, 2003] Smith, L. B. and Thelen, E. (2003). Development as a dynamic system. *TRENDS in Cognitive Sciences*, 7(8) :343–348.
- [Smithers, 1995] Smithers, T. (1995). On quantitative performance measures of robot behaviour. *Robotics and Autonomous Systems*, 15 :107–133.
- [Soussignan et al., 2006] Soussignan, R., Nadel, J., Canet, P., and Girardin, P. (2006). Sensitivity to social contingency and positive emotion in 2-month-olds. *Infancy*, 10(2) :123–144.
- [Spence, 1937] Spence, K. (1937). Experimental studies of learning and the higher mental processes in infrahuman primates. *Psychological Bulletin*, 10(34) :806–850.

- [Steels, 1994] Steels, L. (1994). Mathematical analysis of behavior systems. In Gaussier, P. and Nicoud, J., editors, *From Perception to Action : PerAc'94*, pages 88–95. IEEE computer society press.
- [Stormack and Braarud, 2004] Stormack, K. and Braarud, H. (2004). Infants' sensitivity to social contingency : a "double video" study of face-to-face communication between 2-to-4-month-olds and their mothers. *Infant Behavior and Development*, 27 :195–203.
- [Stratonovich, 1967] Stratonovich, R. L. (1967). *Topics in the Theory of Random Noise*. Gordon and Breach, Science publishers, New-York.
- [Striano et al., 2005] Striano, T., Henning, A., and Stahl, D. (2005). Sensitivity to social contingencies between 1 and 3 months of age. *Developmental Science*, 8(6) :509–518.
- [Sumioka et al., 2005] Sumioka, H., Hosoda, K., Yoshikawa, Y., and Asada, M. (2005). Motion-triggered human-robot synchronization for autonomous acquisition of joint attention. In *The 4th International Conference on Development and Learning (IEEE'2005)*, pages 194–194. IEEE.
- [Thelen et al., 2001] Thelen, E., Schöner, G., Scheier, C., and Smith, L. B. (2001). The dynamics of embodiment : A field theory of infant perseverative reaching. *Behavioral and Brain Sciences*, 24 :1–86.
- [Thelen and Smith, 1994] Thelen, E. and Smith, L. (1994). *A dynamic systems approach to the development of cognition and action*. MIT Press, Bradford Books, Cambridge, MA.
- [Theureau, 1999] Theureau, J. (1999). *Cours : Théorie et méthodes d'analyse de l'action et ingénierie. Anthropologie cognitive et ingénierie*, chapter 5. UTC/SHT, Compiègne. <http://www.coursdaction.net/>.
- [Thorndike, 1898] Thorndike, E. (1898). Animal intelligence : An experimental study of the associative process in animals. *Psychology Rev. Monogr.*, 2(8) :551–553.
- [Thorpe, 1963] Thorpe, W. (1963). *Learning and instinct in animals*. Harvard University Press, Cambridge, MA.
- [Tomasello, 1990] Tomasello, M. (1990). *Cultural transmission in the tool use and communicatory signaling of chimpanzees ?*, pages 274–311. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [Tomasello et al., 1993] Tomasello, M., Kruger, A., and Ratner, H. (1993). Cultural learning. *Behavioral and Brain Sciences*, 16 :495–552.
- [Tremblay-Leveau and Nadel, 1995] Tremblay-Leveau, H. and Nadel, J. (1995). Young children's communication skills in triads. *International Journal of Behavioral Development*, 18(2) :227–242.
- [Tremblay-Leveau and Nadel, 1996] Tremblay-Leveau, H. and Nadel, J. (1996). Exclusion in triads : Can it serve "metacommunicative" knowledge in 11- and 23-month-old children? *British Journal of Developmental Psychology*, 14 :145–158.

- [Tronick et al., 1978] Tronick, E., Als, H., Adamson, L., Wise, S., and Brazelton, T. (1978). The infants' response to entrapment between contradictory messages in face-to-face interactions. *Journal of the American Academy of Child Psychiatry (Psychiatrics)*., 17 :1–13.
- [Uzgiris, 1981] Uzgiris, I. C. (1981). Two functions of imitation during infancy. *International Journal of Behavioral Development*, 4 :1–12.
- [Varela, 1989] Varela, F. (1989). *Autonomie et Connaissance*. Seuil.
- [Varela, 2006] Varela, F. (2006). *La Complexité, vertiges et promesses*, chapter VIII, Autopoïese et émergence, page 168. Le Pommier/Poche.
- [Varela et al., 1993] Varela, F., Thompson, E., and Rosch, E. (1993). *The Embodied Mind : Cognitive science and human experience*. MIT Press, Cambridge, MA.
- [Varela, 1995] Varela, F. J. (1995). *Invitation aux sciences cognitives*. Editions du Seuil, Paris.
- [Vouloumanos and Werker, 2004] Vouloumanos, A. and Werker, J. (2004). Tuned to the signal : the privileged status of speech for young infants. *Developmental Science*, 7 :270–276.
- [Walker-Andrews, 1997] Walker-Andrews, A. (1997). Infant's perception of expressive behaviors : differentiation of multimodal information. *Psychological Bulletin*, 121 :437–456.
- [Wallon, 1942] Wallon, H. (1942). *De l'acte à la pensée*. Flammarion, Paris.
- [Weng et al., 2001] Weng, J., McClelland, J., Pentland, A., Sporns, O., Stockman, I., Sur, M., and Thelen, E. (2001). Autonomous mental development by robots and animals. *Science*, 291(5504) :599–600.
- [Weng and Zhang, 2002] Weng, J. and Zhang, Y. (2002). Developmental robots : A new paradigm. In *Proc. Second International Workshop on Epigenetic Robotics : Modeling Cognitive Development in Robotic Systems*, pages 10–11, Edinburgh, Scotland.
- [Wermeter et al., 2004] Wermeter, S., Weber, C., Elshaw, M., Panchev, C., Erwin, H., and Pulvermuller, F. (2004). Towards multimodal neural robot learning. *Robotics and Autonomous Systems*, 47 :171–175.
- [Whiten and Ham, 1992] Whiten, A. and Ham, R. (1992). On the nature and evolution of imitation in the animal kingdom : Reappraisal of a century of research. *Advances in the study of behavior*, 21 :239–283.
- [Wikipedia, 2007] Wikipedia (2007). Le contenu de l'encyclopédie libre Wikipedia a été utilisé avec précaution étant donné la nature libre de ses contributions. Lorsqu'il est cité pour son exhaustivité et sa concision il est accompagné d'autres références, plus contrôlées. In *Wikipedia, l'encyclopédie libre.*, <http://www.wikipedia.org/>.
- [Yando et al., 1978] Yando, R., Seitz, V., and Zigler, E. (1978). *Imitation : a developmental perspective*. Halsted Press, Hillsdale, NJ.
- [Zazzo, 1957] Zazzo, R. (1957). Le problème de l'imitation chez le nouveau-né. *Enfance*, 10 :135–142.

- [Zlatev and Balkenius, 2001] Zlatev, J. and Balkenius, C. (2001). Introduction : Why “epigenetic robotics”? In *Proceedings of the first international conference on Epigenetic Robotics, EpiRob’01*, pages 1–4, Lund, Sweden.
- [Zrehen and Gaussier, 1994] Zrehen, S. and Gaussier, P. (1994). Why topological maps are useful for learning in an autonomous agent. In Nicoud, J. and Gaussier, P., editors, *From perception to action conference*, Los Alamitos, CA. IEEE Press.

ANNEXE

A. PELLETEUSE

PEL13C-V

CERTIFICAT DE CONFORMITÉ RELATIF AUX ÉQUIPEMENTS DE TRAVAIL ET MOYEN DE PROTECTION D'OCCASION

Le responsable de la location, soussigné :

Société Kiloutou - Services Techniques
Rue du Chemin Vert - CRT n°3 - 59818 Lesquin

Déclare que l'équipement de travail d'occasion désigné
ci-après sous la référence interne de la Société :

PEL13C

et désigné sous l'appellation constructeur :

Pelleteuse

est conforme aux règles techniques applicables
de la directive machines n° 98/37/CEE, directive C.E.M
n° 89/336/CEE, directive limitation des émissions
sonores n° 2000/14/CEE

Fait à Lesquin, le 01 Janvier 2005.

P. Lescouffe

Responsable Service Etudes Techniques



FICHE CONSEILS

→ Pelleteuse compacte - 1,3t chenilles caoutchouc - diesel (Volvo EC13XR)



Kiloutou vous propose une gamme complète
d'engins de terrassement : pelleteuses compactes
jusqu'à 7 tonnes, chargeuses compactes ou articulées,
dumpers, rouleaux de compactage... Nous pouvons livrer
ces matériels sur vos chantiers. Pour votre confort et votre
sécurité, des équipements de protection (gants, casques,
harnais anti-chute...) sont également disponibles dans votre
agence. Rendez-vous dans votre magasin Kiloutou le plus
proche ou sur www.kiloutou.fr.

Les photos et indications ne sont pas contractuelles. Les données techniques peuvent être sujettes à de légères variations, en fonction des modèles d'appareils.

Février 2007

www.kiloutou.fr



www.kiloutou.fr

→ DONNÉES TECHNIQUES

Poids :	1151 kg
Profondeur de fouille :	1862 mm
Hauteur de déchargement :	2292 mm
Largeur de godet :	400 mm
Force d'arrachement :	700 kN
Force de cavage :	1100 DaN
Pente franchissable :	13,5°
Puissance moteur :	19 CV

→ ACCESSOIRES DISPONIBLES À LA LOCATION

- Brise-roche hydraulique, code MAR050
- Godet rétro, largeur 200 mm, code G1T20
- Godet rétro, largeur 250 mm, code G1T25
- Godet curage, largeur 1000 mm, code C1T100

→ CONSOMMABLES

- Service carburant / litre, code 520115

→ RÈGLES DE SÉCURITÉ



ATTENTION : Prenez garde aux mouvements des autres engins de chantier
et aux personnels présents sur la zone de travail.



ATTENTION : L'opérateur doit être titulaire d'un CACES cat.1
(recommandation CNAMTS R372).



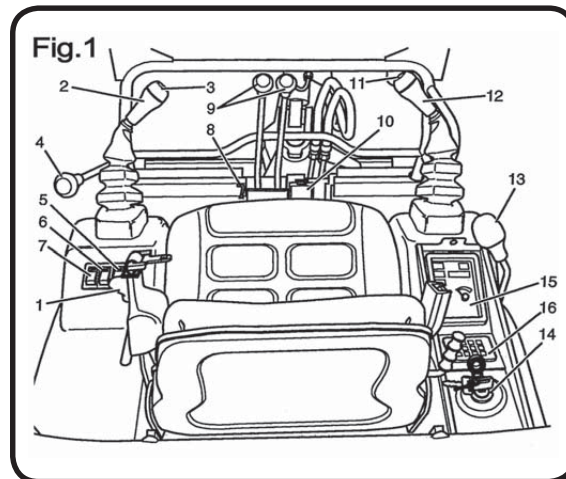
ATTENTION : Les opérations de levage et manutention sont interdites
avec ce type de machine.

- N'utilisez jamais la pelle sans disposer des instructions. Lisez les autocollants apposés sur la machine.
- N'utilisez jamais la machine sans le canopy.
- Avant tout travail, vérifiez auprès des entreprises de services publics la présence de conduites électriques (aériennes ou enterrées), d'eau, de gaz... et gardez une distance de sécurité avec celles-ci.
- Pour les manœuvres où le conducteur ne voit pas l'équipement de travail, il doit se faire guider.
- Contrôlez la bonne fixation des équipements de travail.
- N'utilisez pas la machine sous l'emprise de l'alcool, de médicaments ou de drogues.
- N'utilisez pas la machine dans un milieu explosif.
- Attachez soigneusement votre ceinture de sécurité. N'utilisez les commandes que depuis le siège de l'opérateur.
- Gardez les pieds et les mains sur les commandes.
- Évitez de tourner ou de circuler avec l'accessoire déployé. Regardez toujours dans le sens de la marche.
- Évitez de déporter les charges en pente. Déportez les charges lentement et aussi bas que possible.
- Pour quitter la pelle : abaissez le godet ou l'accessoire sur le sol, arrêtez le moteur et retirez la clé, relevez la console de commandes.
- Écartez toujours les chenilles lorsque vous travaillez sur une pente ou sur terrain accidenté.
- Ne modifiez jamais la pelle.
- Arrêtez le moteur et laissez-le refroidir avant de faire l'appoint de carburant. Ne fumez pas.
- Gardez le capot du moteur fermé.
- Maintenez la zone du moteur exempte de tout matériau inflammable.
- Maintenez la flèche centrée et les accessoires aussi bas que possible lorsque vous circulez sur des pentes ou sur du terrain accidenté.
- Maintenez les autres personnes à au moins 6 mètres de l'équipement pendant son utilisation.
- Vérifiez où se situe la lame avant de circuler. Quand la lame est située à l'arrière, utilisez les leviers de direction dans le sens opposé à celui utilisé lorsque la lame est située à l'avant.
- Ne transportez jamais de passagers.
- Toujours effectuer un test de toutes les fonctions et un contrôle visuel d'état du matériel avant chaque prise de poste.

→ MISE EN SERVICE - CONSEILS D'UTILISATION

DESCRIPTION DES COMMANDES → FIG.1

- 1 Commande d'accélération moteur. Accélération : amenez le levier vers l'arrière. Décélération : amenez le levier vers l'avant.
- 2 Manipulateur gauche : voir détail des mouvements sur Fig.2.
- 3 Sélection départ de flèche ou orientation tourelle. Selon la position de cet interrupteur, le manipulateur gauche commandera soit la rotation de tourelle, soit l'orientation de la flèche.
- 4 Levier de verrouillage des commandes. Pour déverrouiller les commandes, poussez le levier vers l'avant. Lorsque la pelle est à l'arrêt, les commandes doivent être verrouillées (levier vers l'arrière).
- 5 Interrupteur du phare de travail.
- 6 Inutilisé.
- 7 Sélecteur de vitesses de translation lente ou rapide.
- 8 Axe de verrouillage de l'orientation de tourelle.
- 9 Commandes de translation. Voir détail des mouvements sur Fig.3.
- 10 Commandes d'accessoires hydrauliques.
- 11 Avertisseur sonore.
- 12 Manipulateur droit. Voir détail des mouvements sur Fig.4.
- 13 Commandes de lame de remblayage. Montée de lame : amenez le levier vers l'arrière. Descente de lame : amenez le levier vers l'avant.
- 14 Contacteur de démarrage.
- 15 Tableau de bord.
- 16 Antidémarrage codé.



DÉMARRAGE ET ARRÊT DE LA PELLE → FIG.5

- 1 Placez la clé de contact sur la position "I" : le voyant rouge s'allume.
- 2 Composez le code à 4 chiffres donné lors de la livraison de la machine, puis appuyez sur la touche étoile, le voyant rouge clignote.
- 3 Laissez préchauffer le moteur jusqu'à extinction du voyant de préchauffage sur le tableau de bord.
- 4 Démarrez le moteur en amenant la clé de contact sur la position "II". Relâchez la clé lorsque le moteur est démarré. Laissez chauffer le moteur à mi-régime quelques minutes avant de commencer le travail.

ARRÊT DE LA PELLE

- 1 Placez la machine sur un sol stable, hors des zones de circulation et de travail.
- 2 Posez les équipements de travail au sol.
- 3 Tirez le levier de verrouillage des commandes.
- 4 Coupez le moteur et retirez les clés de contact pour éviter toute utilisation frauduleuse.

RECOMMANDATIONS D'UTILISATION

- Lors d'excavations, baissez la lame pour plus de stabilité.
- Ne creusez pas sous la pelle.
- N'utilisez pas le godet comme marteau ou engin de battage.
- Pour creuser les sols durs, brisez au préalable avec un marteau hydraulique.
- Ne déplacez pas la pelle lorsque le godet est au sol.
- Pentes : déplacez vous dans le sens de la pente, ne la traversez pas et évitez les virages serrés, positionnez le godet à 20 / 30 cm du sol. Travaillez dans le sens de la pente. Ne faites pas de mouvements dangereux aggravants : rotation de tourelle ou départ de flèche, surtout godet chargé.

UTILISATION D'ACCESSOIRES

- Les accessoires hydrauliques compatibles avec la pelle sont commandés à l'aide de la pédale (rep.10-Fig.1).
- Pour monter un accessoire, posez le bras au sol, coupez le contact du moteur puis actionnez plusieurs fois la pédale de commande (rep.10-Fig.1) pour dépressuriser le circuit hydraulique.
- Montez l'accessoire sur le bras grâce à l'attache rapide. Avancez la platine du balancier dans l'attache rapide de l'accessoire jusqu'au verrouillage automatique. Effectuez des essais de mouvements près du sol pour vérifier le bon verrouillage. Branchez-le sur les coupleurs hydrauliques situés sur le côté de la flèche.

→ ENTRETIEN JOURNALIER

- Graissez tous les axes pivot du godet, du balancier, de la flèche et son articulation.
- Contrôlez la tension des chenilles.
- Contrôlez le vérin et les points pivot des accessoires.
- Vérifiez le canopy ou la cabine de l'opérateur (ROPS / TOPS) et la visserie de fixation.
- Contrôlez l'état de la ceinture de sécurité et de ses fixations.
- Contrôlez l'état des autocollants et remplacez-les si nécessaire.
- Vérifiez le verrouillage des consoles de commande.
- Contrôlez le filtre à air et les flexibles d'admission.
- Vérifiez le niveau de réfrigérant et l'étanchéité du circuit de refroidissement du moteur.
- Vérifiez le niveau d'huile moteur et l'étanchéité du moteur.
- Vérifiez qu'il n'y a pas de matériaux inflammables dans le compartiment moteur.
- Vérifiez le niveau d'huile hydraulique et l'étanchéité du circuit hydraulique.

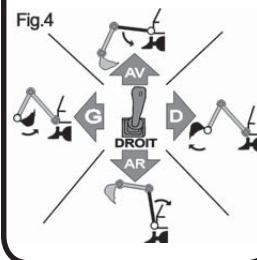
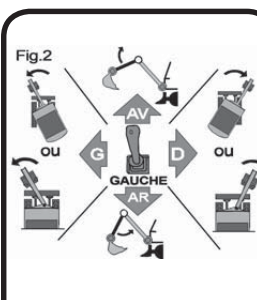
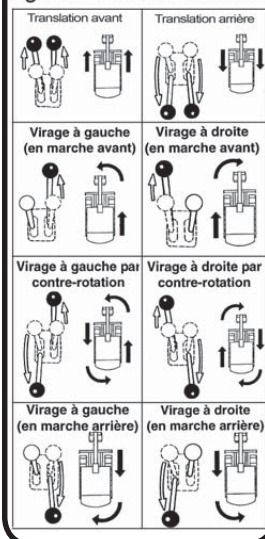


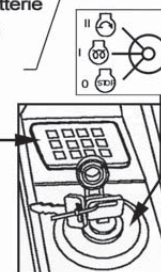
Fig.3 Commandes de translation



- Sécurité moteur
- Préchauffage
- Pression d'huile moteur
- Température moteur
- Charge Batterie
- Colmatage filtre à air

Fig.5

TEMOINS DE TABLEAU DE BORD



**B. LE ROBOT QUI UTILISE LES
SIGNAUX PHATIQUES DE
L'HUMAIN**

B.1 La prédiction du délais

La prédiction du rythme est un dérivé de l'architecture de Andry et Revel [Andry and Revel, 2006] destinée à prédire des séquences complexes temporelles. Dans notre cas la séquence se trouve réduite à deux évènements successifs, la production motrice du robot et la perception d'une action du partenaire. La prédiction du délais est calculée par deux groupes de neurones liés entre eux par des liens modifiables.

Le premier groupe est une *base de temps*, c'est à dire un groupe de neurones dont tous les neurones sont activés par une unique entrée, mais dont chacun des neurones à une dynamique d'activation différente, allant de très rapide à très lente. L'entrée active l'ensemble des neurones à l'instant t_0 , chaque neurone a une dynamique d'activation $Act_i(t)$ dépendant de sa position i dans le groupe de la forme $Act_i(t) = \frac{n}{i}\alpha(t - t_0)$ (où n est le nombre de neurones du groupe, voir les graphiques du haut de la figure B.2). À partir de l'instant où les neurones sont activés par l'entrée, ce groupe décrit donc l'écoulement du temps avec une précision d'autant plus grande que l'on est proche de l'instant d'activation.

L'information de délais entre actions du robot et actions du partenaire est contenue dans les liens *de un vers tous* entre les deux groupes. Andry et Revel [Andry and Revel, 2006] proposent un apprentissage en un coup du délais d_i entre deux évènements ev_i et ev_{i+1} d'une séquence. Pour cela, après l'évènement ev_i , lorsque l'évènement ev_{i+1} arrive les activations du groupe *base de temps* sont mémorisés dans les poids. Notons que pour pouvoir apprendre une séquence de n évènements, le deuxième groupe doit contenir n neurones, et vers chacun des neurones du groupe de prédiction du délais il y a autant de liaisons que de neurones dans la *base de temps*. Les activations des neurones du groupe *base de temps* au moment de l'évènement ev_{i+1} représentent de manière unique le délais d_i séparant ev_{i+1} de ev_i . Les poids appris représentent donc de manière univoque ce délais d_i .

Comme spécifié plus haut, notre architecture ne prédit qu'un délais unique entre les propres actions du robot et les actions qu'il perçoit, le deuxième groupe, de *prédiction du délais* ne contient donc qu'un unique neurone, lié à chacun des neurones de la *base de temps* (voir fig.B.2). Nous avons aussi modifié la règle d'apprentissage en un coup en une règle d'apprentissage qui moyenne le délais prédit entre deux évènements : $P_i(t + 1) = P_i(t) + \tau \times (E_i(t) - P_i(t))$ où P_i est le poids du lien i , E_i est l'entrée de ce lien et τ la vitesse d'apprentissage (lorsque $\tau = 1$, l'apprentissage se fait en un coup). Il est important de moyenner ce délais prédit parce qu'il est caractéristique de l'interaction qui se met en place entre l'humain et le robot : Quand l'interaction se passe bien, l'humain revient à ce rythme d'interaction.

Le second groupe est le groupe prédisant le délais à partir de l'activation de la *base de temps* et des poids des liens entre les deux groupes. L'information sur le délais à prédire est contenue dans les poids des liens, l'activation du neurone de sortie est :

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e^{-\frac{1}{2\delta^2}(E_i - P_i)^2} \text{ où } \delta \text{ est un coefficient dont dépend la largeur de la gaus-}$$

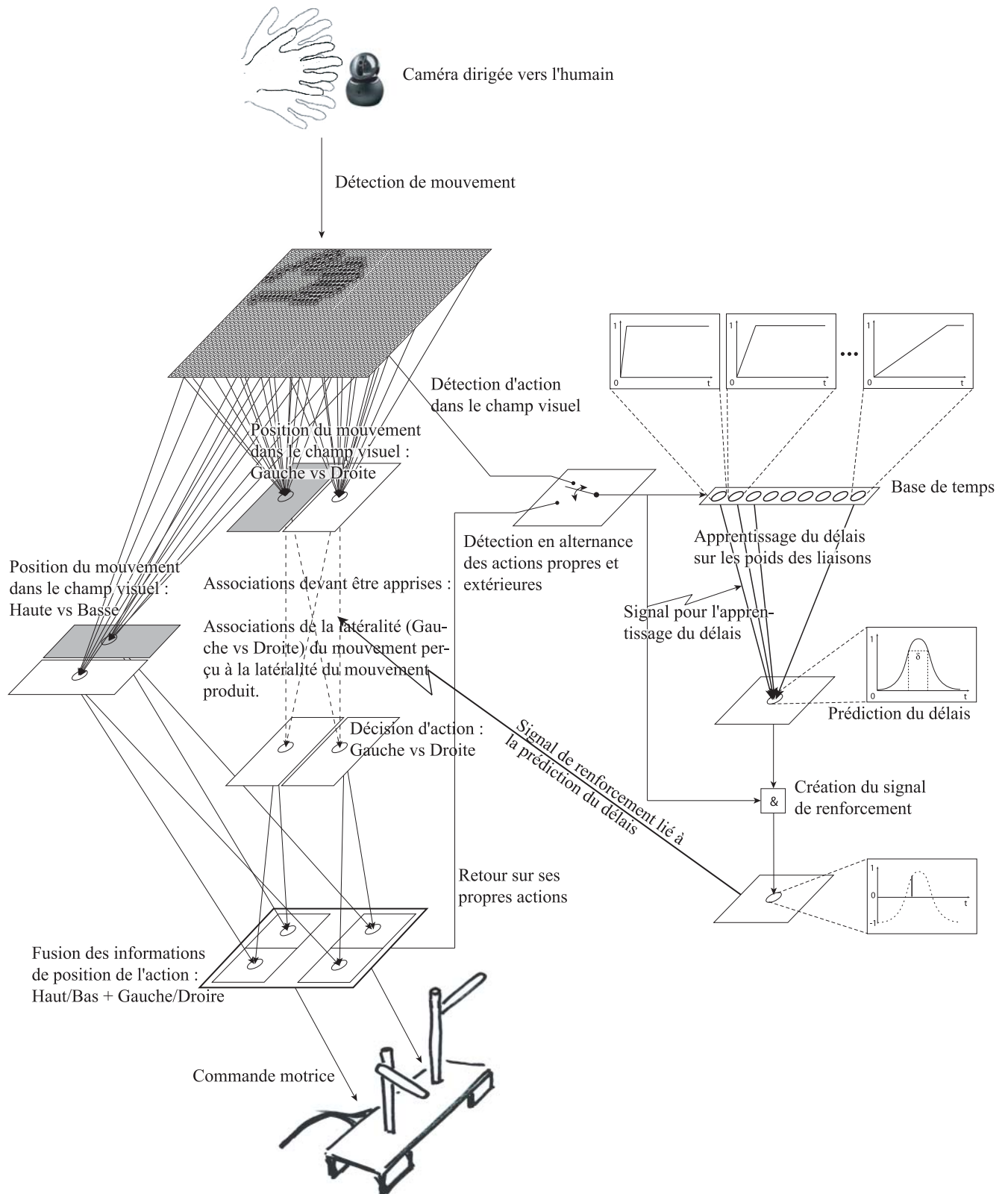


Fig. B.1: Architecture d'ADRIANA, permettant au robot en interaction avec un humain de détecter et utiliser pour un apprentissage les *phatique* renvoyé par l'humain.

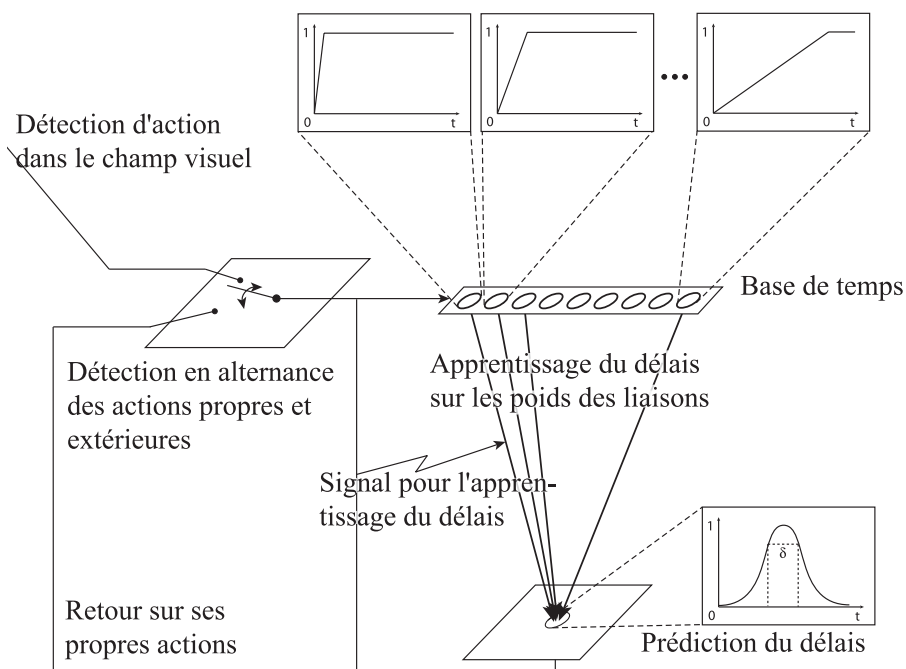


Fig. B.2: Détection du délais entre production propres au robot et action de l'humain perçue dans le champ visuel. Un premier groupe de neurones, la *base de temps* «mesure» l'écoulement du temps dès que le robot produit une action, tandis que les liens vers un second groupe de neurones, la *prédiction du délais*, voient leurs poids modifiés au moment où une action de l'humain est perçue de manière à mémoriser le délais mesuré par la *base de temps*.

sienne $e^{-\frac{1}{2\delta^2}x^2}$

La prédiction du délais est donc une somme de *gaussiennes* : une *gaussienne* par neurone de la *base de temps*, centrée sur le délais prédit, lorsque $E_i = P_i$. C'est ce signal, qui s'apparente lui-même à une gaussienne centrée sur le délais prédit, qui permettra de construire le signal de de renforcement.

B.2 La création du signal de renforcement

Le signal de renforcement se doit d'être représentatif de la qualité de l'interaction. Pour créer ce signal de renforcement nous disposons de deux choses, d'une part d'une prédiction du délais sous forme de *gaussienne* centrée sur le délais prédit (voir section B.1) et d'autre part du délais réel, signal instantané provenant de la perception d'action dans le champ visuel (voir figure B.3). né provenant de la perception d'action dans le champ visuel (voir figure B.3).

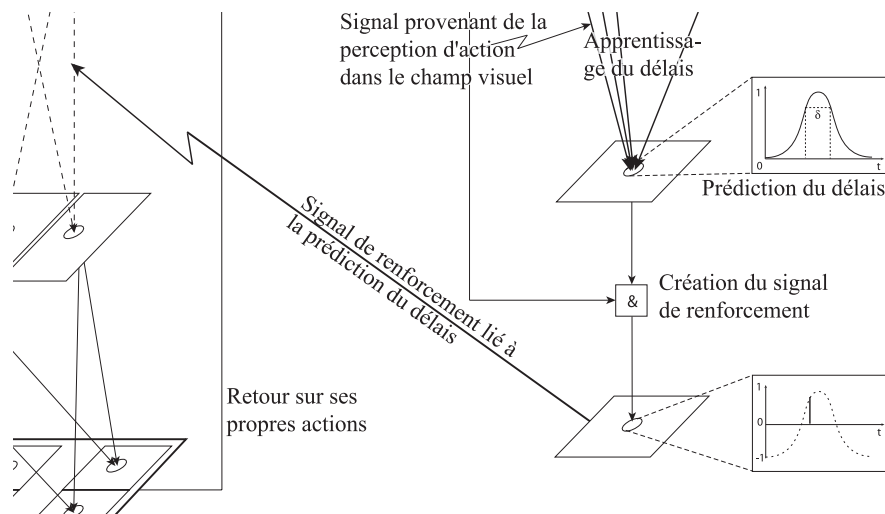


Fig. B.3: Le signal de renforcement est construit en fonction de la qualité de l'interaction. Meilleure est l'interaction, plus l'humain est régulier dans sa production par rapport au robot et donc plus le délais robot-humain prédit est respecté. Lorsque l'action de l'humain est détecté, la valeur de la prédiction du délais, une gaussienne centrée sur le délais prédit, est relevée. Il s'agit d'une valeur appartenant à $[0; 1]$ maximal lorsque la prédiction est exacte et qui diminue lorsque le délais réelle s'écarte (en avance ou en retard) de la prédiction.

Le signal de renforcement est la valeur de la *gaussienne* de prédiction du délais

à l'instant où une action dans le champ visuel est perçue, c'est-à-dire à l'instant où un signal provient de la détection de mouvement : ceci est symbolisé par le \mathcal{E} sur la figure B.3.

Ce signal de renforcement compris entre 0 et 1 est ensuite (lors de l'apprentissage des liens, voir section B.3) projeté entre -1 et 1 . Ainsi un renforcement strictement inférieur à $0,5$ constitue un renforcement négatif et un renforcement strictement supérieur à $0,5$ constitue un renforcement positif. Nous noterons que la largeur de la gaussienne doit ici être déterminée avec soin : il faut qu'elle soit suffisamment large pour tolérer des petites variations dans les délais de production de l'humain, mais suffisamment étroite pour détecter les variations de délais caractéristiques d'une «contrariété» de l'humain.

Finalement, meilleure est la prédiction du délai au regard du délai réel, meilleur est le signal de renforcement donc, meilleur est le renforcement, meilleure est la régularité de l'interaction (et donc, selon notre hypothèse, meilleure est sa qualité).

B.3 L'apprentissage par renforcement retardé

[Revel, 1997] Les liens ne sont modifiés que si un signal de renforcement ($\neq 0$) arrive sur la liaison. Ce signal de renforcement est fourni par une autre partie de l'architecture (voir section B.2) indépendamment de l'évolution des liaisons entre entrée et sortie. Et ce signal de renforcement n'arrive que lorsqu'un délai a été prédit. Ainsi le signal de renforcement n'est pas forcément en relation avec l'association la plus récemment proposée par le système. Nous sommes donc obligés de partir du principe que le signal de renforcement porte sur un certain nombre d'associations qui le précèdent.

La règle d'apprentissage est une règle locale, c'est-à-dire qu'elle s'applique à une liaison entre un neurone d'entrée et un neurone de sortie et qu'elle dépend uniquement des activations de ces deux neurones. Ainsi, étant donnée une liaison $E_i \rightarrow S_j$, à chaque pas de temps, le taux d'activation $ActE_i$ de son entrée E_i est mis à jour. Il s'agit du pourcentage de fois où l'entrée s'est vue activée sur une fenêtre de largeur $\approx \tau \times 5$ itérations :

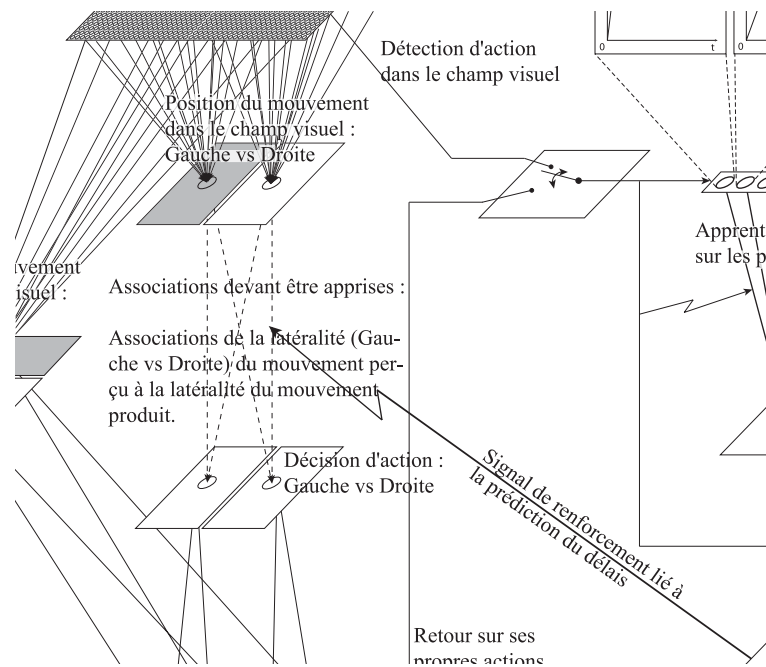


Fig. B.4: Des liens «de un vers tous» lient les deux neurones du groupe représentant la position *Gauche* ou *Droite* du mouvement dans le champ visuel aux deux neurones du groupe représentant la décision d'action, mouvement du bras gauche ou mouvement du bras droit. Ces liens ont un poids nul au début de l'expérience donc la décision d'action se fait au hasard. Par la suite le signal de renforcement vient renseigner chaque liaison sur sa pertinence. C'est tout ce dont dispose le mécanisme d'apprentissage, un renforcement tardif (non directement lié aux activations) et les statistiques des activations pour chaque liaison.

$$ActE_i(t+1) = \frac{(\tau \times ActE_i(t) + E_i(t))}{(\tau+1)} \text{ où } E_i = 0 \text{ ou } 1.$$

Lorsque l'ensemble de l'architecture produit un ($Renf \neq 0$) alors deux choses supplémentaires sont mises à jour :

D'abord la confiance C_{ij} dans le poids du lien. Elle dépend d'une part du signal de renforcement portant sur l'ensemble des liaisons $Renf$, et d'autre part de l'incidence de ce lien sur le signal de renforcement c'est-à-dire le taux d'activation de l'entrée E_i du lien, $ActE_i$:

$$C_{ij}(t+1) = C_{ij}(t) + \alpha \times (Renf(t) - 0,5) \times 2 \times ActE_i(t) \text{ où } \alpha = 0,5$$

Le signal de renforcement est donc d'abord projeté de $[0; 1]$ dans $[-1; 1]$ puis multiplié par le taux d'activation $ActE_i$ de l'entrée et un coefficient α pour calculer la variation de la confiance dans le poids du lien. Cette variation est ajoutée à la confiance C_{ij} précédente.

Ensuite c'est le poids P_{ij} du lien qui est mis à jour. Cette mise à jour dépend de la confiance C_{ij} qui lui est associée, elle vient elle-même d'être mise à jour, et qui fait office de coefficient de probabilité de maintenir le poids à sa valeur actuelle :

$$\text{si } Tirage \text{ Aléatoire} \geq C_{ij} \text{ alors } P_{ij}(t+1) = 1 - P_{ij}(t) \text{ et } C_{ij}(t+1) = 1 - C_{ij}(t)$$

Si le tirage aléatoire est défavorable au poids, c'est-à-dire supérieur à la confiance dans ce poids, alors le poids, considéré comme non adapté est radicalement modifié (symétriquement par rapport à 0,5), et de ce fait la confiance dans ce poids doit elle aussi être modifiée (symétriquement par rapport à 0,5).

B.4 Résultats préliminaires

En plus d'avoir constaté de visu que le robot imite l'humain, que l'humain est satisfait de l'apprentissage du robot, nous avons mesuré directement au sein de l'architecture en fonctionnement la convergence de cet apprentissage. Nous avons relevé tout d'abord les signaux de renforcement construit à partir de la prédiction du délais (voir section B.2). Ensuite nous avons relevé l'erreur réelle commise par le robot étant donnée la tâche (imitation en miroir). Enfin nous avons considéré l'évolution des poids des liens devant être appris par renforcement retardé, liens entre la position du mouvement dans le champ visuel (droite ou gauche) et la décision d'action (droite ou gauche) (voir section B.3).

Chaque dyade de mouvements humain/robot (représenté par les traits verticaux en pointillés) est accompagnée d'un signal de renforcement. La courbe représentant les signaux de renforcement nous renseigne donc sur le signal de renforcement qu'il a associé à l'interaction en court (voir la courbe du haut de la figure B.5).

Chaque dyade de mouvements humain/robot est accompagnée d'un signal d'erreur calculé de manière ad-hoc par l'architecture mais n'intervenant bien entendu pas pour l'apprentissage. Ce signal d'erreur est soit nul soit égal à un. La courbe *Erreurs réelles* de la figure B.5, nous renseigne donc sur les erreurs commises par le robot (toujours pour la tâche d'imitation en miroir) lors de l'expérience.

Enfin, les dyades de mouvements humain/robot peuvent être accompagnées ou non d'une modification des poids des liens. Chaque poids est soit égal à 0,1 soit égal à 0,9. Le graphique du bas de la figure B.5 montre l'évolution des poids des liens entrants d'un des deux neurones du groupe de sortie, la *Décision d'action* (voir section B.3). Cette courbe nous renseigne donc sur l'évolution de ces deux poids au court du temps, en fonction des signaux de renforcement (graphique du haut), et sur la stabilisation de l'apprentissage.

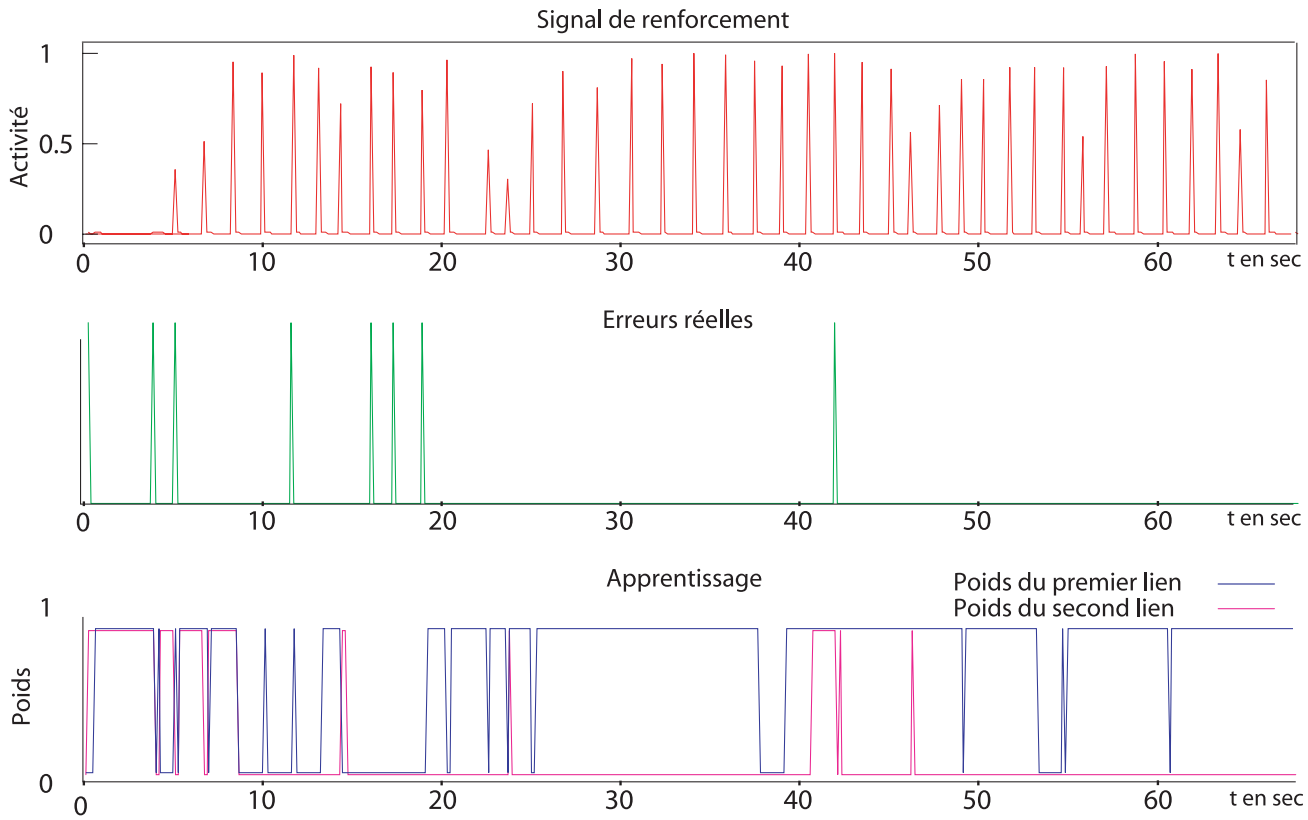


Fig. B.5: Résultats obtenus avec un sujet. La première courbe représente le signal de renforcement calculé à partir de l'information de synchronie : un renforcement négatif est inférieur à 0,5 et un positif est supérieur à 0,5. Ce renforcement dépend de l'adéquation entre le délais prédit et le délais réel. Tout mouvement de l'humain dans le champ visuel du robot entraîne un signal de renforcement (donc chaque signal de renforcement représente une action de l'humain). La deuxième courbe représente les erreurs réelle (eu égard à la consigne) en comparant de manière ad-hoc la latéralité dans le champ visuel et le choix d'action. Le troisième graphe représente l'évolution des poids des liaisons entre perception et action et permet de voir si ces poids se stabilisent et si ils sont bien opposés. Nous noterons qu'outre la stabilisation de l'apprentissage, le signal de renforcement est clairement en rapport avec les erreurs réelles.