



“ Mirroring ” : A solution for the development of cognitive skills

Sofiane Boucenna, Pierre Andry, Philippe Gaussier

► To cite this version:

Sofiane Boucenna, Pierre Andry, Philippe Gaussier. “ Mirroring ” : A solution for the development of cognitive skills. *Intellectica - La revue de l'Association pour la Recherche sur les sciences de la Cognition (ARCo)*, 2016, NOUVELLES APPROCHES EN ROBOTIQUE COGNITIVE, 1. <hal-01485775>

HAL Id: hal-01485775

<https://hal.science/hal-01485775v1>

Submitted on 9 Mar 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Le « mirroring » : Une solution pour le développement de capacités cognitives

« Mirroring » : A solution for the development of cognitive skills

Sofiane Boucenna, Pierre Andry, Philippe Gaussier

ETIS, UMR 8051 / ENSEA, Université Cergy-Pontoise, CNRS, F-95000, Cergy

RESUME

Dans ce travail, nous étudions la place du mirroring dans les premières étapes de l'apprentissage d'un système autonome. Nous proposons 3 expériences qui illustrent comment l'imitation, la reconnaissance des expressions faciales et la référenciation sociale peuvent émerger d'une architecture robotique qui n'est pas capable de faire une différenciation entre soi et l'autre. Trois résultats sont discutés: (1) l'ambiguïté de la perception engendre l'émergence d'imitations gestuelles simples chez un système qui a appris auparavant à associer ses propres perceptions (2) la reconnaissance des expressions faciales émerge d'une architecture similaire quand l'humain fait partie du babillage et de la phase d'apprentissage (mirroring social) au travers d'un jeu imitatif; puis par extension (3) le développement de la référenciation sociale incorporant la capacité de reconnaître, comprendre, répondre et de réguler son comportement en réponse à l'expression émotionnelle du partenaire (double mirroring). Ce travail est basé sur deux mécanismes importants: (1) une architecture sensori-motrice basée sur des mécanismes d'associations permet de développer une perception comme étant un ensemble d'attracteurs dynamiques; (2) le mécanisme de mirroring permet au robot d'associer ce qu'il fait avec ce qu'il voit. Nous montrerons dans la suite de cet article que ces deux hypothèses sont suffisantes pour construire une architecture sensori-motrice capable de développer des capacités cognitives de plus en plus complexes.

mots-clés: imitation, mirroring, émotion, réseaux de neurones, architecture sensori-motrice.

ABSTRACT

In this work, we study the « mirroring » in the early stages of learning in the context of autonomous system. We propose three experiences that highlight how imitation, facial expressions recognition and social referencing can emerge from a robotic architecture that is not able to distinguish between self and other. Three results are discussed: (1) the « ambiguity » of perception produces the emergence of simple gestural imitation in a system that has previously learned to associate its own perceptions (2) facial expressions recognition emerges from a similar architecture, the human plays the role of mirror (social mirroring) through an imitative game; then by extension (3) the development of social referencing

incorporates the ability to recognize, understand, respond to and regulate its behavior in response to human's emotional expression (double mirroring). This work is based on two mechanisms: (1) a sensorimotor architecture based on associative mechanisms allowing to develop a perception as a set of dynamic attractors; (2) mirroring mechanism allowing the robot to associate what it does with what it sees. We will show that these two assumptions are sufficient to build a sensorimotor architecture that is able to develop cognitive abilities increasingly complex.

keywords: imitation, mirroring, emotion, neural networks, sensorimotor architecture.

1. INTRODUCTION

Dès les premières semaines de vie, les interactions sociales et affectives sont au coeur du développement cognitif du nouveau-né. Jérôme Bruner (Bruner 1983) - influencé par Vygotski (Vygotski 1935)- montre que le développement cognitif est intimement lié et influencé par les interactions sociales. Les parents sont des outils permettant le développement de l'enfant, ils adaptent inconsciemment leurs comportements pour donner aux enfants les informations nécessaires pour développer des compétences cognitives et résoudre des problèmes concrets. Bruner souligne que l'enfant apprend en interagissant avec l'adulte. Les adultes sont, en quelque sorte « préprogrammés » pour les aider; ce qui marque une rupture avec Piaget pour qui l'enfant apprend seul par l'action (Piaget 1952) et où le mirroring et la dimension sociale restent très marginaux.

Au cours de nos études pluridisciplinaires sur le développement épigénétique d'architectures cognitives, deux « familles » de comportements sont apparues être d'une importance centrale dans le développement des agents : l'imitation et le mirroring. En psychologie, les deux termes sont décrits comme des comportements différents : le mirroring est un ensemble d'actions non intentionnelles produit par l'adulte en situation d'interaction avec le jeune enfant ou l'adulte, tandis que l'imitation est un comportement de l'enfant, traditionnellement décrit comme motivé et conscient -ou du moins possédant des degrés divers de motivation- et généralement associée à une fonction d'apprentissage manifeste (Thorndike 1898, Piaget 1945, Byrne et Russon 1998, Tomasello 2005). Enfin, nombres de travaux récents ont participés à faire remonter l'intérêt scientifique de formes plus élémentaires d'imitation (aussi appelée « imitation bas-niveau ») et sous tendues par des réseaux de neurones miroirs. Ces réseaux sont vus comme un mécanisme perception-action constituant une des bases possible de la cognition sociale (Gallese 1996, Gallese 2003, Arbib 2010). Les imitations de bas-niveau dites aussi imitations spontanées (c'est-à-dire sans but ou sans planification) (Butterworth 1999, Nadel 2005) constituent clairement un moyen de communication (un vocabulaire gestuel et expressif) pouvant être utilisé pour montrer l'intérêt porté à un partenaire (Uzgiris 1999, Nadel 2014). A cela s'ajoute les imitations néo natales (Maratos 1973, Meltzoff et Moore 1977, Meltzoff et Moore 1983), dont la fonction est encore sujette à débat.

Dans nos travaux, le robot est un outil d'investigation destiné à comprendre le développement et les mécanismes d'adaptation du jeune enfant. Le robot peut être vu comme une sorte de nouveau-né qui possède très peu d'a priori sur l'environnement extérieur mais qui peut apprendre des régularités de son environnement à force d'interagir avec ce dernier. Les modèles computationnels que nous incorporons sur le robot permettent de questionner des modèles du développement et de proposer des algorithmes permettant l'adaptation de robots autonomes.

Dans cet article, nous souhaitons discuter le lien entre imitation et mirroring au cours de trois expériences basées sur trois architectures de contrôle construites selon les mêmes principes de fonctionnement sensori-moteur et les mêmes règles d'apprentissage lorsqu'elles sont placées en interaction avec l'environnement.

Dans la première expérience nous montrons comment un comportement d'imitation simple résulte de l'effet de bord d'une architecture initialement conçue comme un homéostat ayant appris des associations visuo-motrices liées à son propre corps. Dans ce cas, l'ambiguïté de la perception, c'est à dire le simple décalage de perception (le robot croit voir sa propre main alors qu'il s'agit de la main d'un humain) conjugué à l'action du robot pour réduire ce décalage (comportement homéostatique) suffit à produire une « imitation » de geste entre l'humain et le robot sans que ce dernier n'ait été programmé pour. Il est à noter que le comportement d' « imitation » produit et que nous appelons plutôt « imitation bas-niveau » pourrait correspondre à une sorte de précurseur à la fois d'imitation et de mirroring : il s'agit d'un comportement non motivé, spontané ne présentant pas directement de fonction d'apprentissage ou de communication explicite (dans Gaussier 1998, Andry 2004, Revel 2009, de Rengervé 2011, Andry 2011, nous montrons que des modèles d'apprentissage et de communication exploitent cette architecture, mais qu'elle ne suffit pas à elle seule pour entretenir une interaction, support de l'apprentissage et de la communication). De manière similaire nous faisons le rapprochement avec l'humain adulte, où ce comportement « d'imitation » est toujours présent comme un sous-jacent comportemental, puisqu'un dispositif expérimental (expérience de Fourniered et Jeannerod, décrite en section 1.) destiné à rendre les perceptions ambiguës est nécessaire pour mettre en évidence ce comportement.

Dans la seconde expérience, nous montrons que la même architecture qui n'apprend plus son propre corps, mais des associations visuo-motrices au cours de jeux d'imitation faciales où l'humain sert de miroir au robot permettent l'émergence de la reconnaissance des expressions faciales. Ici, le modèle du robot par rapport à l'expérience précédente n'a pas changé, mais l'humain participe au babillage du robot pendant sa phase d'apprentissage visuo-moteur. Dans ce cas, si (et seulement si) les actions de l'humain sont semblables à celles du robot (mirroring) alors des associations cohérentes peuvent être construites par le robot. La reconnaissance des expressions faciales émerge alors comme le résultat d'un couplage sensori-moteur entre l'humain et le robot.

Dans la troisième expérience, nous nous intéressons au développement de la référenciation sociale qui est la capacité à reconnaître, comprendre, répondre et réguler son comportement en réponse à l'expression émotionnelle du partenaire. Encore une fois, nous reprenons les mêmes principes de construction des architectures précédentes, en exposant notre robot à un « double mirroring » où l'humain imite d'abord le robot pour l'aider à apprendre (mirroring social) et est ensuite imité par le robot permettant à ce dernier d'adapter son comportement à des environnements nouveaux.

Il est à remarquer qu'à chaque fois, notre robot est incapable de différencier son propre corps du corps de l'autre. Il ne possède aucune information a priori sur ce qu'est « soi » ou « l'autre ». Nous verrons que dans les trois expériences, c'est précisément l'incapacité de notre système à pouvoir former une limite de « soi » (perceptions ambiguës) qui le pousse à agir et à apprendre. Pourtant un observateur naïf peut être tenté d'interpréter les actions du robot comme des comportements qui impliquent la distinction entre soi et l'autre : imiter, reproduire les gestes de l'autre, reconnaître les expressions émotionnelles, posséder une référenciation sociale. Cette distinction entre les éléments d'architecture (pas de notion de soi) et l'interprétation possible des comportements observés (agentivité) nous permet de questionner la manière de concevoir les intelligences artificielles en robotique autonome.

2. DE L'AMBIGUITE DE LA PERCEPTION A L'EMERGENCE DE COMPORTEMENTS D'IMITATION

Nielsen, puis Fournier et Jeannerod ont proposé une expérience qui illustre comment l'ambiguïté de la perception joue un rôle dans notre contrôle moteur, notamment lorsque la vision est impliquée (Nielsen 1963, Fournier et Jeannerod, 1998). Dans cette expérience, les sujets ont comme consigne de tracer des lignes verticales sur une tablette graphique. Les sujets ne voient pas leur main, cachée par un miroir, mais le résultat de leur tracé en temps réel (le résultat du tracé est projeté sur le miroir par un ordinateur, si bien que les sujets voient le tracé apparaître simultanément à l'action qu'ils sont en train d'effectuer). Les sujets sont divisés en deux groupes: un groupe dit en condition « normale » voit son propre tracé comme décrit précédemment, et un groupe dit « perturbé », qui voit un tracé volontairement dévié de côté (sur la droite ou sur la gauche) par l'ordinateur. Les conclusions de l'expérience montrent que les sujets du groupe « perturbé » (1) corrigent le tracé par une action qui va dans le sens opposé de la déviation perçue, et (2) que ces mêmes sujets n'ont pas conscience de percevoir ni de corriger activement une déviation franche (la déviation est largement sous estimée).

Cette première expérience nous montre que lorsque la perception d'un sujet est ambiguë (dans le cas présent, les sujets ne font pas la distinction entre un tracé qui résulte de leur propre action motrice d'un tracé généré ou modifié par l'ordinateur), elle a des conséquences sur le contrôle moteur qui est engendré, et que ce contrôle s'effectue de manière inconsciente. D'autre part, la nature du contrôle inconscient qui est exercé consiste en une *correction motrice* de l'erreur perçue : la main (l'action) va dans la direction opposée de la direction du trait, de manière à agir pour rapprocher la nouvelle proprioception de la perception visuelle. Dans la suite de cet article, nous proposons de repartir de l'ensemble des observations de l'expérience de Fournier et Jeannerod, et de montrer comment une architecture de contrôle basée le principe de correction, que nous appellerons homéostasie (Ashby 1947), peut donner naissance à des comportements simple d'imitation lorsque notre système est « perturbé » par l'ambiguïté de la perception.

2.1 Une architecture pour le contrôle visuo-moteur d'un bras de robot

Notre point de départ est une architecture de contrôle permettant à un bras de robot de se positionner dans son espace de travail. Nous présentons ici une architecture simplifiée qui apprend l'équilibre entre ses différentes perceptions afin de pouvoir les impliquer dans le contrôle de son bras. Nous nous référons à (Gaussier et al. 1998, Andry et al. 2001, Andry et al. 2004) pour les principes de base et à (Renvergé et al. 2014) pour une version plus complète, et qui prend en compte l'ensemble des problèmes de contrôle et d'apprentissage. Il est à noter que cette architecture ne présente pas de spécificité de conception pour produire des imitations, il s'agit uniquement d'un système minimal qui n'a aucune information *a priori* sur la nature de l'environnement auquel il est exposé : il n'y a pas de traitement ou de capteur spécifique pour différencier l'autre de soi, ni d'étiquetage extérieur des personnes ou des objets. Les seules informations utilisées sont la vision (*V*), la proprioception (*P*), et la commande motrice permettant l'action (*Act*). Notre problématique de départ était d'étudier comment un robot peut initier une séquence de développement épigénétique et accéder à des compétences de plus haut niveau lorsqu'il fait l'acquisition, par lui-même, de régularités sur

son propre comportement. Ici l'apprentissage de ces régularités concerne les informations de vision et de proprioception, pendant des étapes de babillage moteur, correspondant aux premiers mois de développement de l'enfant. L'architecture est un *homéostat* qui compare en toute situation les informations visuelles et proprioceptives afin de déterminer les actions à effectuer (Figure 1).

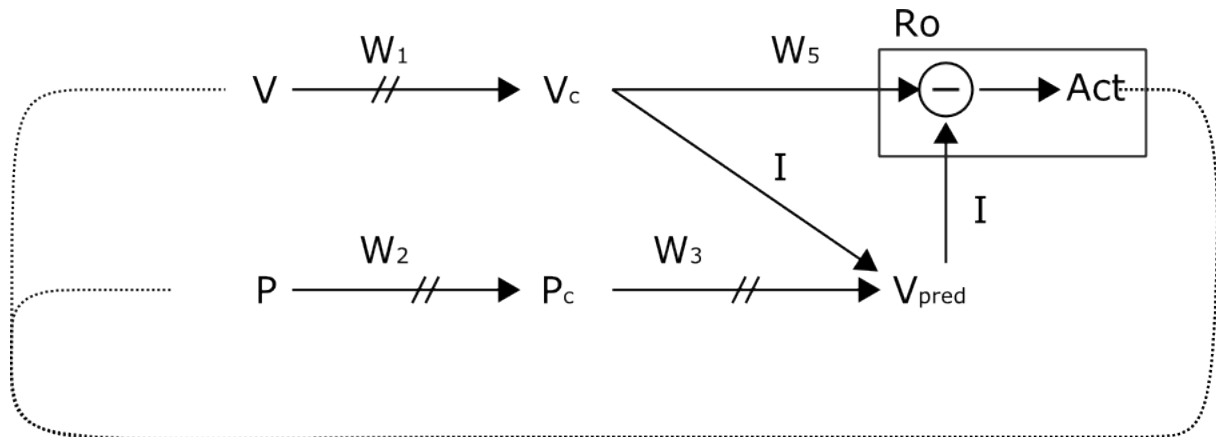
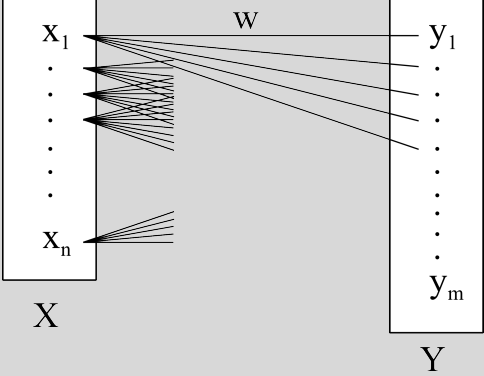


Figure 1 : Architecture simplifiée permettant l'apprentissage d'associations visuo-motrices pour le contrôle d'un bras de robot. V désigne la vision, V_c la vision catégorisée, P la proprioception, P_c la proprioception catégorisée, V_{pred} la vision prédite et Act l'action. Ro désigne l'opération de Read-Out qui permet d'extraire la commande motrice en fonction de la comparaison entre la Vision prédite et la vision catégorisée. W_1 , W_2 et W_3 représentent les matrices de connexions destinées à apprendre des catégories à partir des vecteurs d'entrée. I désigne des matrices de connexions identité qui ne modifient ni les valeurs ni la topologie des entrées (en réseau de neurones, ce sont par exemple des lien de 1 vers 1 qui n'apprennent pas d'information et transmettent l'information telle qu'elle est en entrée). W_5 désigne un matrice de connexion dont les valeurs changent selon si l'agent apprend (matrice nulle) ou s'il n'apprend pas (matrice de connexion identité).

Cet homeostat est décrit ici de manière simple, et tout au long de cet article nous utiliserons un formalisme graphique (Figures 1 et 5) et d'écriture (équations 1 à 12), décrit par (Gaussier et al., 2004) que nous avons résumé dans la table 1. Les informations de vision et de proprioception sont tout d'abord catégorisées pendant une première phase de babillage moteur : un bruit est superposé à Act engendrant des actions aléatoires. Pendant ces actions aléatoires, le robot apprend les catégories V_c et P_c qui permettent de regrouper les entrées voisines autour d'un nombre limité de prototypes. Dans les deux cas, il s'agit d'un apprentissage inspiré de l'algorithme Adaptive Resonance Theory, ART (Carpenter et Grossberg, 1987) qui permet de contrôler le nombre de prototypes appris en fonction d'un paramètre unique de *vigilance* qui contrôle la décision (1) d'adapter le centre de la catégorie en direction du nouveau vecteur d'entrée, ou bien (2) de créer une nouvelle catégorie parce que le nouveau vecteur d'entrée est trop différent du prototype de centre de la classe (Rengervé et al., 2011). Le paramètre de vigilance permet de définir la résolution des calculs, c'est dire le nombre et la finesse attendue des catégories.

Nous reprenons dans cet article une version simplifiée du Formalisme des systèmes Cognitifs présenté pour la première fois dans (Gaussier et al. 2004). Ce formalisme a pour but de pouvoir exprimer de manière simple les grandes familles de processus impliqués dans les architectures de contrôle et les modèles qui décrivent les systèmes cognitifs (robots, agents, modèles d'individus) comme des successions de traitements opérés sur des vecteurs, matrices et scalaires (typiquement les réseaux de neurones, les systèmes de traitement d'image, etc.). Ce formalisme permet de passer rapidement de la description des traitements de l'informations successif (apprentissage, compétition, produits, convolutions, etc.) à des ensembles d'équations munies de règles de simplification. Nous représentons dans cette table les règles d'écriture et de simplification nécessaires à la compréhension de cet article.

Il est à noter que ce formalisme reste non-standard, notamment au niveau du traitement asynchrone de plusieurs produits matriciels (se référer à l'annexe pour un exemple de règle d'apprentissage et son expression dans le formalisme actuel).

Opérandes		type
$X, Y, Z, V_c, V_{pred}, P_c, P_{pred}, Act, Act_H$ etc...		Vecteurs
W, W_{ij}, I , etc.		Matrices de connexions, aussi appelées « liens » ou « liaisons » entre les différentes étapes de traitement. Ces matrices sont constituées des coefficients mis à jours par les algorithmes d'apprentissage (à l'exception des matrices identités, notées I , qui ne sont pas modifiées).
Operateurs		
$c(Z)$		Compétition en sortie du vecteur Z . $c()$ est une fonction de compétition telle que : $c(Z) = (0, 0, \dots, z_j, \dots, 0)$ avec $j = \operatorname{argmax}_i(z_i)$
$W.X$		Produit matriciel du vecteur X par la matrice W
(X, Y)		Traitement asynchrone des deux entrées X et Y . généralement, une règle d'apprentissage s'applique qui dépend de la concurrence temporelle (présence vs absence) des vecteurs X ou Y .
Exemples d'architectures typiques		
Architecture détaillée	Architecture simplifiée	Mise en équation
	$X \xrightarrow{W} Y$ <p>la flèche exprime un lien de 1 élément du vecteur d'entrée vers tous les éléments du vecteur de sortie.</p>	$Y = W.X$ <p>Dans la plupart de cas, le calcul de la sortie du vecteur Y fait intervenir une opération de compétition pour sélectionner la plus forte valeur de Y. Dans ce cas, on écrit :</p> $Y = c(W.X)$ <p>avec c fonction de compétition décrite ci-dessus.</p>

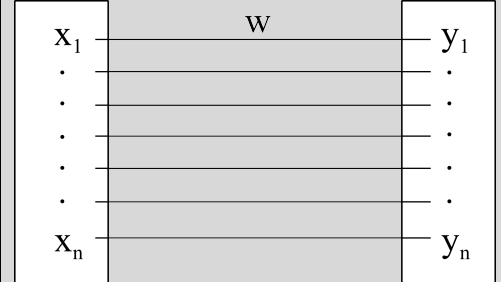
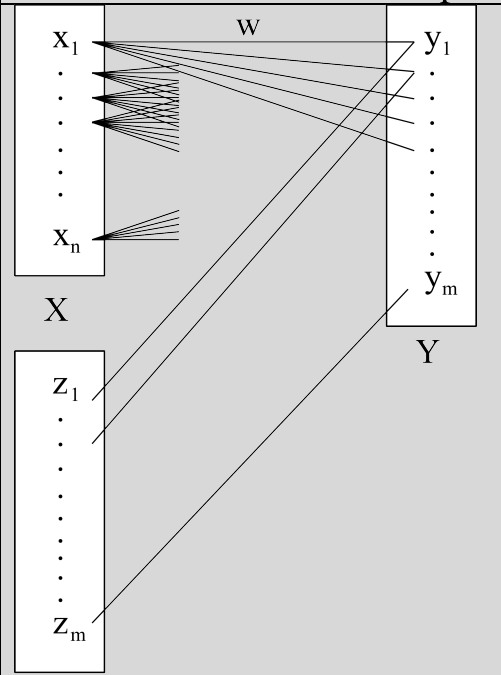
 <p style="text-align: center;">X</p> <p style="text-align: center;">Y</p>	$X \xrightarrow{W} Y$ <p>la flèche exprime un lien de 1 élément du vecteur d'entrée vers l'élément correspondant du vecteur de sortie</p>	$Y = W.X$ <p>La matrice des poids W est une matrice diagonale dont les coefficients sont soit aléatoires (comportement reflexe) soit identité. Dans ce dernier cas, nous notons :</p> $Y = I.X = X$
 <p style="text-align: center;">X</p> <p style="text-align: center;">Y</p> <p style="text-align: center;">Z</p>	$X \xrightarrow{W_1} Y$ $Z \xrightarrow{W_2} Y$ <p>exemple de catégorisation par conditionnement simple : Y apprend à associer un pattern Z avec plusieurs instances de X. Z est dite « entrée inconditionnelle » et X l'entrée conditionnelle. W_1 est la matrice des coefficients qui apprend l'association (les coefficients sont modifiables). W_2 est une matrice identité non modifiable.</p>	$Y = c(W_1.X, W_2.Z)$ $= c(W_1.X, I.Z)$ $= c(W_1.X, Z)$ <p>l'opérateur 'c' fait apparaître que les deux entrées sont traitées lors du calcul de Y. La nature du traitement dépendra de la règle d'apprentissage, et de la concomitance des vecteurs X et Z. Le détail de l'application de cette règle (Widrow-Hoff, LMS) se trouve dans (Gaussier et al., 2004, et reprise en annexe)</p>

Tableau 1 : résumé des principaux éléments du formalisme des systèmes cognitifs utilisé dans cet article pour décrire et simplifier les modèles d'imitation et de mirroring. Selon (Gaussier et al. 2004).

Ainsi, la présence d'une entrée visuelle (par exemple une détection de mouvement) particulière déclenchera l'activation de Vc correspondant à une position visuelle moyenne:

$$Vc = c(W_1.V) \quad (1)$$

Ici, en se référant à l'architecture présentée en Figure 1 et la table 1 intitulé « le formalisme des systèmes cognitifs » Vc s'écrit comme le résultat d'une compétition c appliquée au produit des poids W_1 multiplié à l'entrée V . Les coefficients W_1 sont modifiés itérativement, présentation après présentation de Vc , jusqu'à convergence des catégories.

De la même manière, Pc retourne le prototype de la catégorie proprioceptive gagnante :

$$Pc = c(W_2.P) \quad (2)$$

$Vpred$ apprend à associer un vecteur Vc avec un ou plusieurs vecteurs d'entrée Pc . L'activité de $Vpred$ est calculée par un algorithme de conditionnement auto-supervisé déclenché par la concomitance des informations Pc et Vc (si l'une des informations est absente, il n'y a pas

d'apprentissage, au sens de l'apprentissage Hebbien. L'équation 3 est similaire à celle présentée dans le dernier cas des « architecture typiques » de la table 1, et décrite plus en détail en annexe).

$$V_{pred} = c(I.V_c, W_3.P_c) \quad (3)$$

V_c est le signal à apprendre (on parle aussi de stimulus inconditionnel), et le lien entre V_c et V_{pred} est une transformation identité qui ne fait que propager l'information. V_{pred} apprend V_c en modifiant les coefficients W_3 au sens des moindres carrés (LMS, décrite en annexe) selon l'erreur obtenue en comparant V_c (le signal désiré) à P_c (le signal d'entrée). La modification progressive des valeurs de W_3 s'effectue pendant le babillage : si V_c et P_c concernent respectivement la position visuelle de l'extrémité du bras (dans le champ de vision du robot) et les informations de proprioception de l'ensemble des degrés de liberté du bras, alors notre architecture va progressivement être capable de prédire la sensation visuelle de l'endroit où se trouve l'extrémité du bras (V_{pred}) sur la base de l'information de proprioception *seule*. L'apprentissage est considéré comme complet quand V_{pred} fournit une prédiction visuelle pour l'ensemble des positions possibles du bras (notez qu'après apprentissage, les liens entre V_c et V_{pred} sont forcés à 0, afin de ne considérer que la réponse de V_{pred} en fonction des entrées P_c):

$$\begin{aligned} V_{pred} &= c(I.0, W_3.P_c) \\ &= c(W_3.P_c) \\ &= V_c \end{aligned} \quad (4)$$

Enfin, il est à noter que avant l'apprentissage, il n'y a pas de contrôle moteur provoqué par P_c ou V_c : $V_{pred} = 0$ (absence de prédiction) et $W_5 = 0$ (valeur nulle pour que V_c n'influe pas sur le bruit faisant bouger Act).

Lorsque le robot a appris correctement, le fait de regarder l'extrémité de son propre bras engendre une erreur nulle car :

$$\begin{aligned} Erreur &= (V_c.W_5) - (V_{pred}.I) \\ &= (V_c.I) - (V_{pred}.I) \\ &= V_c - V_{pred} \end{aligned} \quad (5)$$

Dans ce cas d'apprentissage parfait, l'équation (4) nous indique que $V_{pred} = V_c$ et donc la résolution de l'équation (5) nous donne $Erreur = 0$. Ainsi, grâce à l'apprentissage effectué pendant le babillage moteur, les perceptions du robot sont à l'équilibre (grâce à la transformation des poids W_3). L'architecture fonctionne comme un homéostat, c'est dire que le robot tend à rejoindre une position d'équilibre entre V_c et P_c en modifiant par l'action Act la position de son bras. En d'autres termes, si un déséquilibre est calculé, le robot bouge son bras pour en amener l'extrémité (V_c) dans la zone visuelle activée par V_{pred} . Le mouvement du bras engendrera une modification de la proprioception, c'est à dire de P_c et de V_{pred} pour que l'erreur entre V_{pred} et V_c s'annule. Cette action est commandée par le Read-out, mécanisme d'extraction de la commande en fonction de l'erreur calculée. Pour des systèmes robotiques simples (bras allant jusque 4 degrés de libertés) dont les articulations sont alignées avec le référentiel visuel (mouvements horizontaux et verticaux), nous avons utilisé comme

mécanisme de Read-out des champs de neurones dynamique (Schöner et al, 1995, Andry et al., 2001, Andry et al., 2004) qui réalisent une intégration temporelle et spatiale de l'activité de V_c en produisant un attracteur centré sur le maximum d'activité de V_c et permettent de calculer la commande à envoyer sur chaque articulation pour rejoindre pas à pas la situation d'équilibre (le centre de l'attracteur positionné en V_c). Ce type de Read-out peut être assimilé à une remontée du gradient d'erreur entre V_c et V_{pred} qui peut être exprimé de la manière suivante :

$$Ro = act = grad (V_c - V_{pred}) \quad (6)$$

L'action du robot est la dérivée de la fonction ($V_c - V_{pred}$), c'est à dire la fonction d'erreur construite à partir de l'apprentissage des entrées P_c , V_c et V_{pred} . D'une manière générale nous retrouvons dans l'équation la liaison entre la perception et l'action, où la perception ($V_c - V_{pred}$) est une fonction construite lors d'un apprentissage basé sur l'information sensorielles disponibles (V et P), et l'action qui en résulte est une dérivée de la fonction potentielle construite sur les perceptions du système.

Avec des bras de robots plus complexes et dont les degrés de liberté ne sont pas simplement alignés sur le champ de vision, nous avons utilisé une version similaire de l'architecture avec un calcul de Act qui s'exécute dans l'espace proprioceptif du bras. Dans cas, l'apprentissage se déroule sur une unité P_{pred} à la place de V_{pred} . P_{pred} retourne l'information articulaire (au format de la proprioception) en fonction de la position de la cible dans l'espace visuel. Dans ce cas c'est l'erreur entre P_{pred} et P_c qui est comparée, puis extraite par un mécanisme de Read-Out décrit dans (de Rengervé 2015), et dont nous avons montré que les propriétés dynamiques sont similaires aux champs de neurones, et l'action de remontée de gradient de l'erreur similaire.

Ainsi, lorsque notre robot a appris à associer ses différentes information perceptives, il se retrouve dans un état d'équilibre sans mouvement : le robot se regarde lui-même dans la position d'équilibre. Dans la section suivante, nous montrons qu'un dispositif expérimental similaire à l'expérience de Fournier et Jeannerod va produire le même effet de correction par l'action résultant en une imitation de gestes simples qui émerge comme un effet de bord de notre architecture.

2.2 Une imitation simple émerge de l'ambiguïté de la perception

Notre robot possède des capacités visuelles limitées, basée uniquement sur la détection du mouvement, ou la détection d'une teinte particulière (notre modèle développemental concerne au départ un système aux perceptions volontairement limitées). Un tel système, par exemple s'il n'utilise que la détection du mouvement, n'est pas capable de discriminer sa propre main de la main de l'humain.

Supposons que nous éteignons le robot et que nous décalions mécaniquement la tête du robot de quelques degrés (par exemple 20 degrés). Lorsque nous rallumons le robot nous n'indiquons pas à l'architecture qu'une rotation de la caméra a été opérée, et nous plaçons le bras de robot en dehors de son champ de vision. Dans cette situation, aucune erreur n'est détectée, puis qu'il n'y a pas de stimulus visuel (le bras n'est pas dans le champ de vision). Supposons maintenant qu'un humain fasse un mouvement dans le champ de vision du robot (Figure 2). Ce décalage du champ de vision peut être interprété comme un cadre expérimental similaire à l'expérience de Fournier et Jeannerod : le robot ne voit pas où se trouve l'extrémité de son bras (caché par un miroir) tandis qu'il pense regarder en direction de cet endroit.

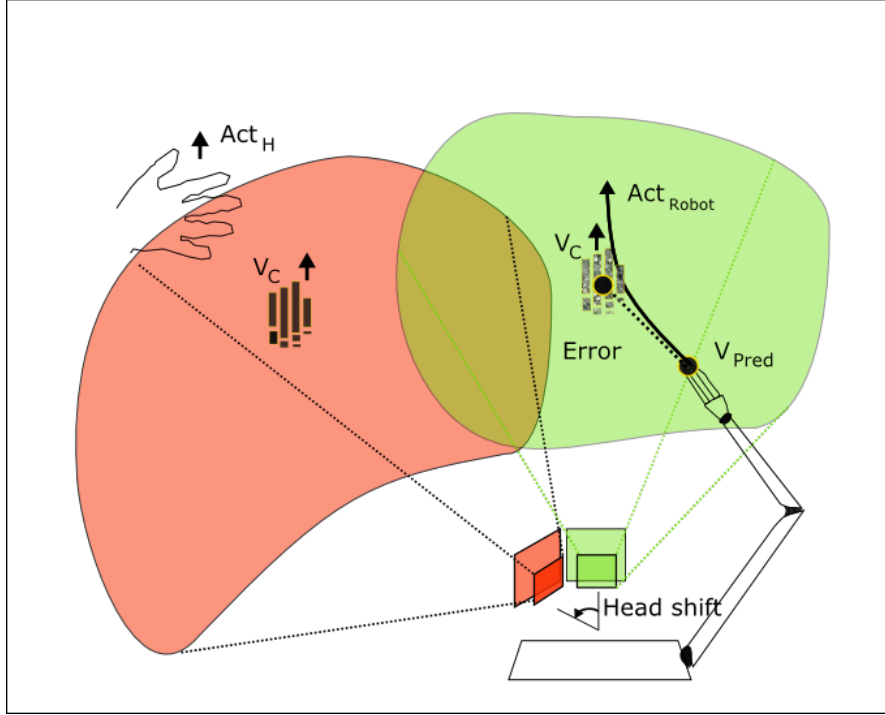


Figure 2 : Projection dans l'espace de travail de l'erreur perçue par le robot, due (1) au décalage de la tête de robot (et de son champ de vision), et (2) à l'ambiguïté de la perception lui faisant interpréter Act_H comme la réponse visuelle (V_C) de son propre bras.

Si maintenant un intervenant humain se met à bouger la main dans le champ de vision du robot (Act_H), il va provoquer une entrée visuelle V activant à son tour V_C qui sera interprété comme une activité visuelle résultant de son propre bras (ambiguïté de la perception du robot).

$$V_C = Act_H \quad (7)$$

A son tour, V_C engendrera une erreur avec la position du bras retourne par V_{pred} , que le robot corrigera en effectuant un mouvement dans la direction opposée de l'erreur, c'est à dire dans la direction du gradient :

$$\begin{aligned} Ro = Act_{Robot} &= grad(V_C - V_{pred}) \\ &= grad(Act_H \\ &\quad - V_{pred}) \end{aligned} \quad (8)$$

On observe dans cette équation que Act_{Robot} tend à minimiser l'erreur entre V_{pred} et Act_H c'est à dire que l'action du robot sera effectuée de manière à rapprocher V_{pred} de Act_H (Act_{Robot} ayant pour effet de « déplacer » V_{pred} en activant les catégories correspondant au mouvement en cours). Ainsi la direction du mouvement du robot sera la même que la direction du mouvement humain. Il est à noter que dans ce type d'expériences, nous limitons les contacts entre la main de l'humain et celle du robot, par exemple en effectuant des mouvements quelques centimètre en dehors de l'espace de travail du robot, ou en décalant significativement la tête du robot (l'effet sera alors le même que se déplacer en dehors de l'espace atteignable par le bras de robot).

Du point de vue d'un observateur extérieur, l'extrémité du robot et la main de l'humain se déplacent avec une dynamique similaire et aux yeux de ce dernier, un mécanisme d'imitation de gestes émerge. La figure 3 illustre ce comportement d'imitation obtenue avec un bras de robot katana à 6 degrés de liberté puis le bras du robot humanoïde hydraulique Tino dans le cadre du test de notre architecture sur des mouvements libres et simples dans l'espace de travail.

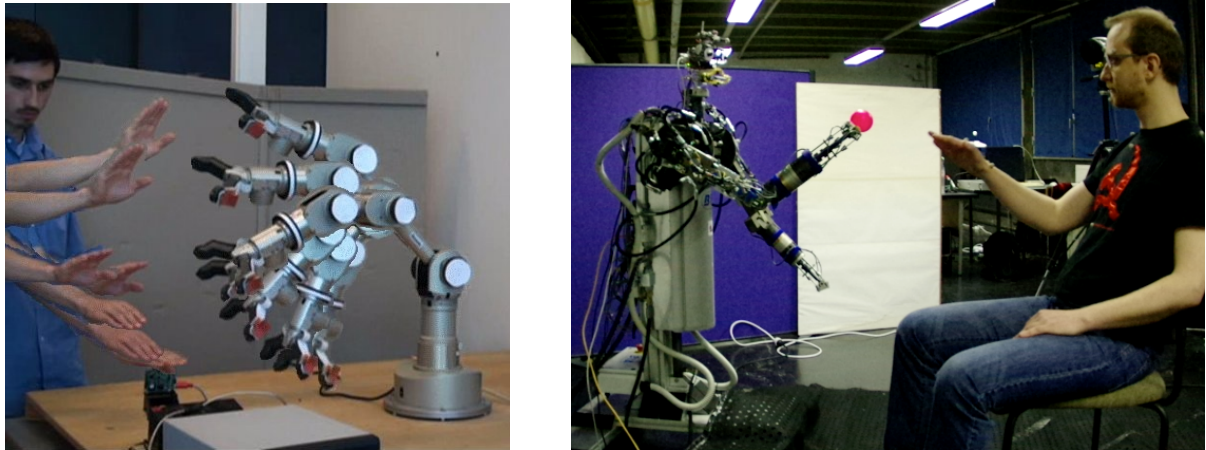


Figure 3. Exemples de comportements d'imitation obtenus avec des dispositifs robotiques différents. La même architecture de contrôle s'applique aux différents modèles de robots. Cette architecture est basée sur des boucles sensori-motrices capable d'apprendre les associations entre vision de l'extrémité du bras et le retour proprioceptif de chacun des degrés de liberté du bras. Le comportement d'imitation est un effet de bord de l'homéostat qui régule les perceptions visuelles et proprioceptives et de l'ambiguïté de la perception : la vision élémentaire du robot (détection de mouvement ou de teinte) ne lui permet pas de faire la distinction entre son bras et celui de l'humain.

Dans chacun des cas, c'est parce que la perception du robot est ambiguë (pas de possibilité de faire la distinction entre le bras de l'autre et son propre bras) et que l'architecture est conçue comme un simple homéostat (l'action du robot sert à corriger des erreurs de perceptions) que le mécanisme d'imitation émerge. Il est intéressant de noter que ce mécanisme d'imitation simple peut devenir une nouvelle base d'apprentissage et de communication pour l'acquisition de compétence plus complexes. Ainsi, il y a une fonction de communication manifeste dans le fait de faire le même geste que « l'autre ». Nous avons par exemple utilisé cette propriété pour travailler sur le rythme d'interaction dans des jeux d'imitation simple (Andry et al. 2011). D'autre part, la fonction d'apprentissage de l'imitation est manifeste aussi, et cette imitation nous sert de point de départ pour apprendre des séquences d'action plus complexes impliquant des objets (Rengervé et al 2011) : nous pouvons « piloter » par imitation le bras de robot pour lui faire réaliser des actions simples (comme déplacer un objet), actions qu'il pourra apprendre comme étant des séquences de catégories de sa propre sensori-motricité, sans avoir à résoudre de mise en correspondance entre les actions de l'humain et ses propres actions. Cette mise en correspondance est souvent considérée comme un problème mathématique difficile (Nehaniv et Dautenhahn 2002) si l'on considère l'ensemble des transformations d'espace qui sont nécessaires pour faire correspondre les gestes, la dynamique et le rôle de chaque articulation entre les corps peu semblables de l'imité (ici un humain) et de l'imitant (ici un robot). À l'opposé de ces méthodes analytiques, notre expérience simple nous amène à réfléchir sur la manière dont il faut considérer l'imitation en robotique. Notre robot ne se pose pas de problème de correspondance, ni de problème de définition sur ce qui appartient à « soi » ou à « l'autre ». Sa dynamique est par définition liée aux stimuli visuels et proprioceptifs entrants, et c'est justement parce que notre robot n'est pas capable de faire de différence entre « soi » et « l'autre » qu'il agit pour corriger toute erreur perceptive qu'elle provienne d'un stimulus résultant de ses propres mouvements ou

bien d'ailleurs. En étendant ce raisonnement, nous renversons le problème des correspondances ou des prérequis nécessaires au comportement d'imitation : le comportement d'imitation simple qui émerge de notre homéostat pourrait être un élément important pour permettre la distinction, par l'action, entre soi et l'autre.

3 LE « MIRRORING » SOCIAL VU COMME UN MOYEN DE COMMUNICATION

L'imitation faciale pose la question de l'imitation sous un angle différent. L'enfant voit les expressions du visages des adultes mais pas sa propre expression. Comment peut-il faire pour se représenter l'invisible? Comment peut-il associer ses propres actes qu'il ne voit pas avec les actes de l'autre qu'il peut voir? Les travaux sur l'imitation mettent en évidence le développement des associations entre perception et action qui est directement lié au développement du soi/non soi (soi et l'autre). Les nouveau-nés âgés de quelques minutes imitent des actes humains comme la protrusion de la langue ou l'ouverture de la bouche (Maratos 1973, Meltzoff et Moore 1977, Meltzoff et Moore 1983). Ces expériences montrent que l'imitation n'est pas le résultat d'un apprentissage et surtout que l'imitation est une capacité qui est présente à la naissance chez l'humain. Les résultats semblent montrer également que les nouveau-nés font l'association entre leurs propres visages (ressentis mais non vus à la naissance) et le visage des autres (vus mais non ressentis). L'idée fondamentale est que l'adulte est « comme moi » ce qui permet à l'enfant de construire des équivalences avec l'adulte et lui permet de développer des capacités cognitives et sociales. Cependant, Piaget et d'autres soutiennent que l'équivalence entre le moi et l'autre se développe durant les premiers mois chez l'enfant (Piaget 1962). Par exemple, pour la reconnaissance faciale, l'enfant doit acquérir la correspondance entre l'expression visible de l'autre et le mouvement invisible du « moi ». Cette thématique de recherche pose des questions fondamentales du point de vue de la modélisation et du développement précoce. Si la capacité à imiter est innée, quels sont les mécanismes? Pourquoi le nouveau-né imite-t-il?

Nous pensons que les interactions sociales durant lesquelles les parents imitent le jeune enfant en lui renvoyant en miroir ses expressions faciales, permettent à l'enfant d'associer ses états émotionnels internes avec une perception visuelle (le visage souriant de la mère, par exemple). Dans ce cas, le mirroring des parents est un moyen puissant d'apprentissage pour l'enfant. Une autre fonction importante de l'imitation est la communication, elle permet de créer une interaction primaire et non-verbale entre l'enfant et le parent (Nadel 2014). Ce moyen de communication peut être vu comme un signal montrant l'intérêt des parents vis à vis de l'enfant.

Nous défendons l'idée que le mirroring (jeux d'imitation) et des mécanismes associatifs liant les perceptions et les actions sont suffisants pour développer des apprentissages cohérents et dépasser le stade réflexe (état initial). Notre étude est une proposition pouvant modéliser le développement de la reconnaissance des expressions faciales durant les premiers mois de l'enfant. A travers nos expérimentations, nous montrons qu'une tête robotique n'ayant au départ aucune connaissance du monde, peut apprendre à reconnaître des expressions faciales au fur et à mesure des interactions avec des partenaires humains. L'interaction a une place prépondérante pour le développement de capacité cognitive. La question abordée ici est: comment une tête de robot peut-elle apprendre des expressions faciales de manière autonome? Cette question est primordiale pour le développement d'autres compétences comme la référenciation sociale.

Notre point de départ a été motivé par la question de comment un système "naïf" peut apprendre à répondre correctement à l'expression faciale d'une autre personne durant une interaction naturelle (Gergely 1999). "Naturelle" ici signifie que l'interaction devrait être la

moins contraignante possible, sans signal de supervision explicite, sans mécanisme de détection ad-hoc ou sans technique d'enseignement formatée. Dans ce cas, une inspiration est donnée par l'interaction parent-bébé où le très jeune bébé possède un ensemble d'expressions faciales qui sont liées à des états internes. Au tout début de sa vie, le lien avec les expressions de l'autre n'est pas encore construit, on se demande alors comment le lien entre les états internes et les expressions faciales de l'autre peut émerger d'une interaction non-verbale? Nous considérons dans nos développements que le robot est un jeune enfant et le partenaire humain correspond à un parent. Comme dans la section précédente, le robot ne connaît rien sur son environnement. Il ne possède que des comportements réflexes lui permettant de produire des expressions faciales prototypiques. Il se développe et apprend en interagissant avec le monde extérieur où le parent constitue une grande partie de l'environnement et est un élément central pour son développement.

Nous montrons qu'un système robotique peut apprendre à reconnaître des expressions faciales sans avoir un signal de supervision explicite lui permettant d'associer une expression faciale avec un label abstrait ('surprise', 'joie', *etc.*). L'hypothèse que nous soutenons est la suivante: si le « bébé » robot utilise une architecture sensori-motrice pour reconnaître des expressions faciales alors le parent doit imiter les expressions du « bébé » robot pour permettre un apprentissage autonome. Dans une série d'expériences, nous montrons qu'une architecture perception-action basée sur un réseau de neurones est suffisante pour apprendre cette tâche si et seulement si le parent est un miroir pour le robot (il imite les expressions faciales du robot). Notre étude montre que le « mirroring » est primordial pour le développement autonome du robot et par conséquent, nous postulons que ce mécanisme est fondamental pour le développement de la reconnaissance des expressions émotionnelles durant les premiers mois de l'enfant.

Le modèle théorique (décrit ci-dessous) a été testé dans le protocole expérimental suivant: (1) Durant la phase d'apprentissage, la tête robotique produit des expressions faciales en fonction de son propre état interne (*IS1*). Un état interne déclenche une expression faciale parmi la surprise, la joie, la colère, la tristesse et le visage neutre. Durant cette période d'apprentissage, on demande au sujet humain d'imiter les expressions faciales du robot. Cette phase d'apprentissage qui dure environ 2 minutes permet au robot d'apprendre à associer ce qu'il fait avec ce qu'il voit. (2) La phase de reproduction peut alors débiter. Les rôles sont inversés et on demande à l'humain de produire une expression et on teste la capacité du robot à mimer à son tour l'expression faciale du partenaire humain. Durant cette période, le robot doit prédire l'état interne de l'humain (*IS2*) en reconnaissant l'expression faciale de ce dernier.

De manière plus formelle, nous considérons un système simple composé de 2 agents interagissant dans un environnement initialement neutre: les 2 agents peuvent exprimer des expressions faciales (positionnement d'éléments de leur visage) en fonction de leurs états internes et peuvent voir dans leur champ de vision le visage de l'autre (Fig.4).

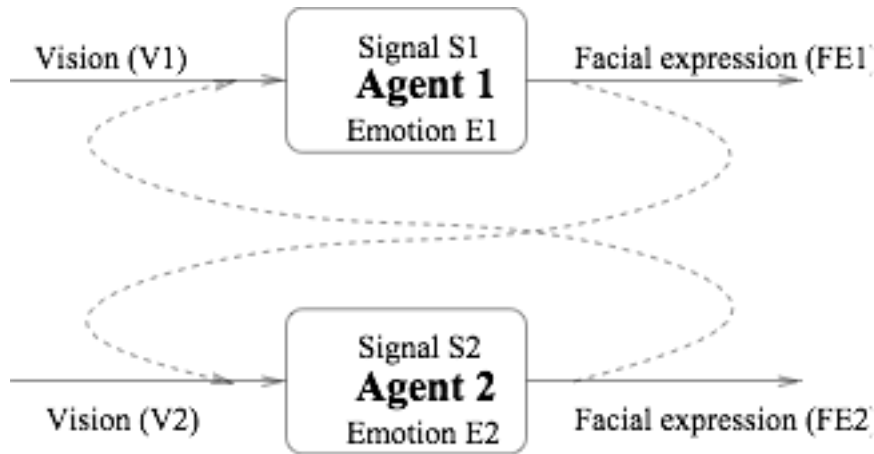


Fig. 4 Représentation du système bidirectionnel étudié. Les deux agents sont l'un en face de l'autre. L'agent 1 est considéré comme un nouveau né et l'agent 2 comme un adulte pouvant imiter les expressions faciales du nourrisson. Les 2 agents sont dirigés par des signaux internes qui peuvent induire des « émotions particulières » (Boucenna 2014a).

L'agent 2 est supposé être un adulte avec une parfaite reconnaissance de l'expression émotionnelle des autres et des capacités de reproduction parfaites. Le second agent est considéré comme un nouveau né sans connaissance du monde extérieur et sans apprentissage du rôle social des expressions faciales. Comment le second agent peut-il développer et acquérir des connaissances? L'interaction avec l'environnement peut être une solution pour la découverte de soi et de l'autre. Nous supposons simplement que l'apprentissage des expressions faciales est possible si et seulement si l'agent 1 produit des expressions et que l'agent 2 l'imité. Par conséquent, si l'agent 1 est doté d'un mécanisme sensori-moteur alors il sera capable d'associer ses sensations avec ses propres actions. Sans langage, sans connaissance de l'autre, l'agent 1 (bébé) pourra reproduire les expressions vues sur le visage d'un expérimentateur. Formellement, l'agent 1 peut être décrit comme sur la figure 5.

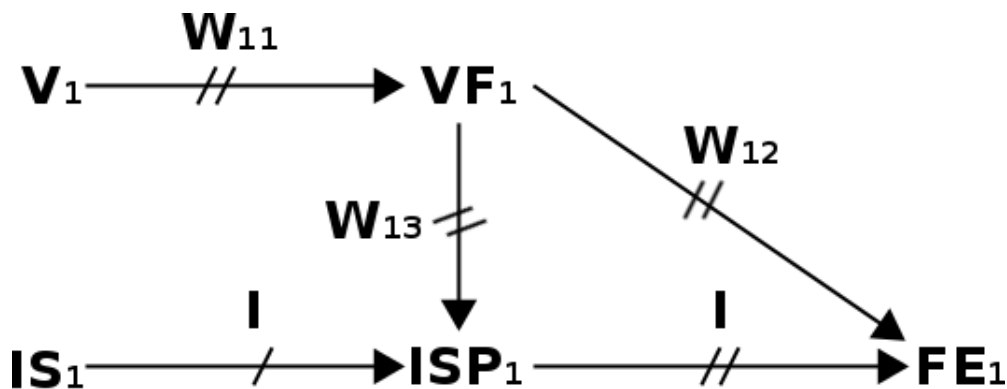


Fig. 5 Représentation schématique d'un agent qui peut exprimer et reconnaître des « émotions ». Les flèches avec un trait représentent des connexions réflexes de « un vers un ». Les flèches avec les deux traits en parallèle représentent des connexions de « un vers tous » modifiables. V: Stimulus visuel, VF: reconnaissance de vue locale (catégorisation), IS: état interne, ISP: prédiction de l'état interne, FE: expression faciale (command motrice).

Nous supposons que nos agents reçoivent un signal visuel V_i correspondant à l'entrée visuelle de l'agent « i ». Cela peut être appris et reconnu par le groupe de neurone VF_i (caractéristiques visuelles de l'agent i), VF_i est le résultat d'un apprentissage non supervisé (Gaussier et al 2004, Boucenna 2010, Boucenna 2014a). Chaque neurone du groupe VF_i apprend un pattern spécifique du visage, par exemple un coin de bouche ou un sourcil froncé.

Ainsi, la présence d'un visage exprimant une expression particulière déclenchera l'activation de plusieurs neurones correspondant à une certaine caractéristique faciale dans le groupe VFi :

$$VFi = c(Wi1 . Vi)$$

où c correspond à un mécanisme de compétition, $Wi1$ représente la matrice de poids des neurones dans le groupe de reconnaissance de l'agent i permettant une quantification des caractéristiques (bouche, sourcils ...). Autrement dit, $Wi1$ correspond aux poids synaptiques reliant les neurones de la couche d'entrée Vi et les neurones de la couche VFi . Tous les neurones de VFi sont reliés à tous les neurones de Vi . Par exemple, si l'agent bébé perçoit un visage exprimant de la joie, la caractéristique première caractérisant cette expression faciale est la bouche. La bouche pourra être apprise par le groupe VFi (un neurone s'activera en présence d'un sourire), une fois appris les poids $Wi1$ reliant l'entrée visuelle au réseau de neurones sont corrélés avec la bouche exprimant un sourire. Le robot n'a pas encore appris que cette expression correspond à la joie, il reste à faire le lien avec l'état interne. Nos agents sont également affectés par la sensation de leur milieu interne (faim, peur...). ISi (état interne de l'agent i où chaque neurone code un état interne spécifique) est lié avec les entrées physiologiques tel que la faim, la peur, le plaisir... L'activation d'un état interne particulier pourra être associée avec un contexte visuel particulier. $ISPi$ est en charge de réaliser cette association ($ISPi$ et ISi ont le même nombre de neurones). Nous supposons que $ISPi$ dépend de la reconnaissance visuelle VFi (visual features) qui elle dépend du signal visuel Vi .

De plus, les agents peuvent exprimer des commandes motrices FEi (Facial Expression i) correspondant aux différentes expressions faciales. Si l'un des deux agents peut agir comme un adulte, il doit avoir la capacité de mimer les expressions faciales de l'autre ou même d'avoir de l'empathie. Les connexions entre la reconnaissance visuelle et le groupe de reconnaissance $ISPi$ représentant l'état interne du robot doivent exister pour afficher une expression émotionnelle et nous devons aussi supposer qu'il y a des connexions allant des signaux internes vers le contrôle des expressions faciales. Les connexions entre l'état interne et la commande motrice peuvent se faire directement (le signal circule sans interférence) ou au travers d'un groupe intermédiaire dévoué à la reconnaissance des expressions émotionnelles $ISPi$. Par souci d'homogénéité, nous supposons que le signal interne active par l'intermédiaire de lien inconditionnel, le groupe $ISPi$ qui lui même active également par des connexions inconditionnelles l'affichage des expressions faciales. Ceci est équivalent à une activation directe de FEi par ISi . Donc, la somme de ces deux flux d'informations est:

$$ISPi = c(I . ISi + Wi3 . VFi)$$

où c correspond à un mécanisme de compétition. Enfin, nous pouvons aussi supposer que l'agent enseignant peut également exprimer une expression faciale sans la "ressentir" (simplement par un comportement imitatif obtenu par reconnaissance de l'expression de l'autre). Cela peut être l'effet d'une résonance émotionnelle ou d'une simple résonance motrice. La sortie motrice des 2 agents dépend à la fois de l'expression faciale reconnue (imitation motrice) et/ou de la volonté d'exprimer un état interne particulier:

$$FEi = c(I . ISPi + Wi2 . VFi)$$

où c correspond à un mécanisme de compétition. Nous pouvons étudier les conditions minimales permettant la fabrication d'un attracteur comportemental global (pour imiter et

comprendre les expressions faciales de l'autre). La Fig. 6 représente le système complet avec les deux agents en interaction.

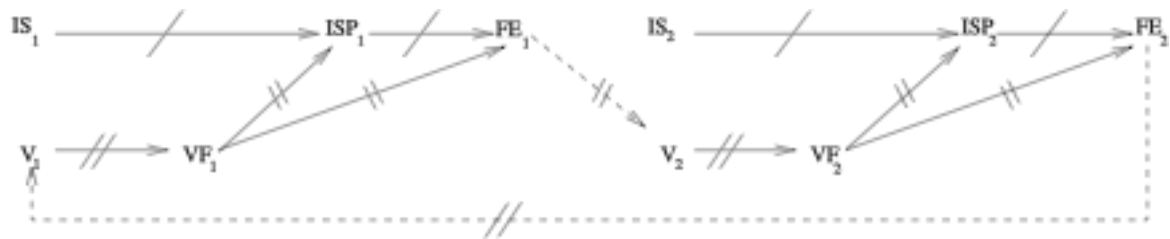


Fig. 6 Représentation schématique du réseau global représentant les interactions expressives émotionnelles entre les 2 agents. Les liens en pointillés représentent les connections venant de l'observation de l'autre individu. L'un des deux agents exprime une expression pendant que l'autre la voit (Boucenna 2014a).

Ce système est considéré comme un réseau virtuel qui peut être étudié de la même manière qu'une architecture isolée. L'architecture converge si et seulement si l'agent enseignant a les connaissances nécessaires pour que les dynamiques du système globale soient stables (boucle de sensation/action). La compréhension de ce genre de système n'est possible qu'à partir du moment où les deux agents (enseignant/apprenant) ne forment qu'une seule entité indissociable. Après simplifications, nous obtenons finalement le réseau de la Fig. 7a. On peut alors simplement en extraire la condition de stabilité durant la période d'apprentissage. Si les deux agents expriment leurs états internes $IS1$ et $IS2$ de façon indépendante ($IS1$ et $IS2$ sont différents n'impliquant pas de corrélation) alors l'apprentissage ne peut pas être cohérent. L'apprentissage ne pouvant pas se stabiliser dans ces conditions et en supposant que l'état interne du bébé n'est pas contrôlable, alors la seule solution est que l'agent "enseignant" imite ou résonne aux expressions faciales du bébé, permettant ainsi une corrélation explicite entre l'état interne du bébé et l'entrée visuelle (l'expression qu'exprime l'agent "enseignant"). Le parent n'est alors rien de plus qu'un miroir (Fig. 7b).

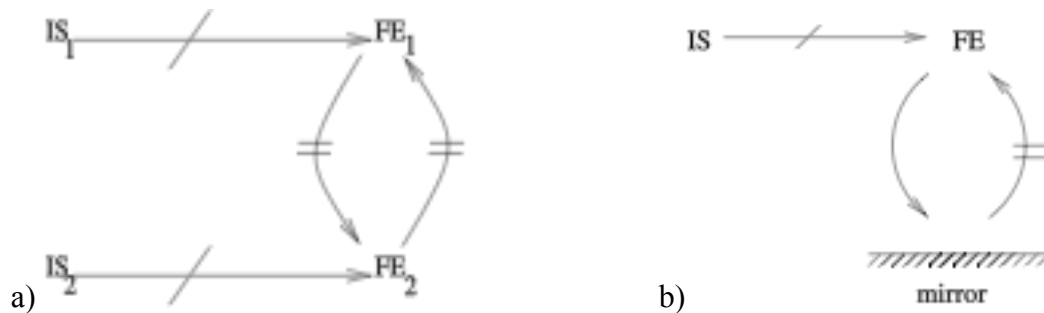


Fig. 7 a) simplification finale du réseau représentant l'interaction entre nos deux agents. b) Architecture minimale permettant à l'agent d'apprendre les associations entre ses états internes et l'expression faciale du parent qui est le reflet de l'agent apprenant. (Boucenna 2014a)

Si cette condition est vérifiée, le système peut apprendre. L'agent 1 étant le nouveau né apprend à associer la reconnaissance visuelle des expressions faciales prototypiques avec ses propres états internes ($ISP1$). L'agent apprend à connecter son "ressenti" lié aux actions, avec la vision des mouvements non "ressentie" de l'autre, ne pouvant voir ses propres actions. Ce

paradigme met en évidence que l'agent nouveau né apprend la corrélation entre ce qu'il ressent et ce qu'il voit.

Ce travail a mis en évidence les mécanismes élémentaires permettant le fonctionnement d'une compétence particulière comme la reconnaissance des expressions faciales. Une architecture sensori-motrice basée sur des réseaux de neurones et le mirroring sont des éléments fondamentaux pour le développement autonome de compétences cognitives et sociales (Boucenna 2014a). Une seule condition est nécessaire pour le développement de ce type de compétence, le robot doit être initiateur dans l'interaction, il produit des actions que l'humain imite. La cohérence entre l'imitant et l'imité permet l'acquisition de ce type de comportement. Enfin, ce modèle théorique a été testé dans des cadres expérimentaux différents où la seule différence est la nature de l'état interne. Dans (Boucenna et al. 2011), le robot apprend la compétence d'attention conjointe grâce à ce jeu d'imitation. Une fois cette compétence apprise, le robot peut orienter son propre regard en fonction du regard de l'autre. Dans (Boucenna et al. 2014c, Boucenna et al. 2016), le robot apprend à reconnaître des postures et profite de la dynamique interactive pour apprendre à reconnaître l'identité d'une personne. Par exemple, pour les postures, les états internes (*IS*) sont considérés comme des états internes de nature motrice. Toutes ces expériences mettent en évidence que ce paradigme théorique et expérimental permet de généraliser à d'autres compétences cognitives mais surtout qu'il pourrait être à la base du développement social.

4. SOCIAL REFERENCING

Dans cette partie, nous nous intéressons au rôle que jouent les émotions via la reconnaissance des expressions faciales dans les interactions sociales. Elles sont au cœur du développement cognitif chez l'enfant et peuvent être vues comme une activité psychologique et biologique se modifiant au cours du développement précoce afin de réguler le comportement de l'enfant. L'objet de cette section n'est pas de définir l'émotion ni même de discuter l'état de l'art mais plutôt de mettre en avant le rôle des émotions (fonctions des émotions). Par exemple, (Hasson et al, 2011) soulignent l'interdépendance de la communication émotionnelle et des aspects de régulation via les émotions. Ils proposent que les émotions doivent être comprises comme un système dynamique liant les interactions sociales (communication) et les interactions avec le monde physique (régulation). En partant de ce point de vue, les émotions sont un moyen: (1) d'auto-régulation qui permet la survie et l'accomplissement de besoins primaires, (2) de régulation interpersonnelle qui permet l'adaptation de l'enfant à un contexte nouveau ou ambigu en interagissant avec un partenaire social et (3) de communication qui permet la transmission d'information émotionnelle face à des situations nouvelles (Hasson et al, 2011). Elles sont un processus complexe évoluant au fur et à mesure des interactions de l'enfant avec son environnement extérieur et permettent de faire face à différents contextes sociaux (Brun et Nadel, 1997). Par exemple, vers 12 mois, les informations émotionnelles fournies par les parents sont utilisées par l'enfant pour s'adapter à une situation ambivalente en régulant son comportement (Feinman 1982).

Le travail que nous présentons dans cette section est important à la fois pour la robotique et pour la psychologie du développement car nous proposons d'étudier les mécanismes permettant le développement du « social referencing ». Cette capacité est un processus cognitif incorporant la capacité à reconnaître, à comprendre, à répondre et à réguler son comportement en réponse à l'expression émotionnelle du partenaire humain. Cela permet à un

enfant de chercher l'information venant d'un autre individu et d'utiliser cette information pour guider son comportement dans un environnement ambigu ou nouveau. Dans ce cas, l'individu parent communique son propre état interne - ici, l'état interne est vu comme un état émotionnel - via son expressivité faciale (aspect communication) et l'enfant utilise cette information pour s'adapter à la situation (aspect régulation). L'état interne du parent est transmis à l'enfant permettant la régulation du comportement de l'enfant (robot). L'interaction émotionnelle semble être une manière rapide et efficace pour déclencher l'apprentissage qui a lieu dès les premiers stades du développement cognitif chez les humains, mais aussi chez d'autres primates (Russel 1997). L'interaction entre la mère et le bébé peut être vue comme un système homéostatique: l'enfant communique son attente dans certaines situations nouvelles et la mère est toujours présente pour l'aider à apprendre. Trevarthen parle de la capacité de l'enfant à ressentir et partager l'état émotionnel (« état interne ») de l'autre (Trevarthen 1993). Meltzoff souligne la capacité extraordinaire des parents à enseigner induisant une capacité exceptionnelle de l'enfant à apprendre (Gopnik 2001).

Le « social referencing » est une capacité cognitive se développant durant la première année chez l'enfant et permettant de fournir à l'enfant (ou au robot) des informations concernant l'environnement. Par exemple, un objet ou un événement peut être associée à une valence émotionnelle positive (ou négative) transmise par l'interaction avec le partenaire social. L'interaction verbale n'est pas nécessaire, seules les valences émotionnelles peuvent être fournies par une variété de modalités comme l'expression faciale, la voix, le geste etc. Nous choisissons d'utiliser l'expressivité faciale qui est un excellent moyen de communiquer des informations dans des situations ambiguës. Comme nous l'avons vu dans la section précédente, l'expressivité faciale du partenaire humain peut être associée aux états internes du robot grâce au mécanisme de « mirroring » et des associations sensori-motrices. Le robot a un ensemble d'expressions qui sont liées avec ses propres états internes, par exemple pleurer quand il a besoin de nourriture ou quand il ressent une douleur. Le développement du « social referencing » permet de proposer un cadre expérimental écologique pour développer des associations entre les états internes du robot et les expressions faciales du partenaire. Dans ce contexte, nous supposons l'existence de voie réflexe permettant la simulation de douleur ou de plaisir. Ces états internes de douleur ou de plaisir peuvent être activés par un capteur tactile dont la fonction est de mesurer la conductivité des objets, par exemple la douleur est simulée par un objet conducteur. Ces signaux permettent au robot d'associer des objets avec des valences émotionnelles positives ou négatives tout en exprimant l'expression faciale correspondante. Par conséquent, si le robot produit une expression en fonction de son état interne et qu'un partenaire humain est présent et l'imité alors le robot peut lier son propre état interne avec l'expression faciale de l'autre.

Une fois ce couplage appris, le partenaire peut partager son état interne via son expressivité faciale lorsque le robot rencontre une situation nouvelle. Par exemple, l'humain exprime la colère devant un objet inconnu et dangereux pour le robot comme pour dire « attention objet dangereux ». Un lien implicite existe entre l'état interne et l'action associé. Le robot adapte son comportement face à cette nouvelle situation en fonction des signaux transmis par l'environnement social. Le double mirroring correspond à ce jeu d'imitation en miroir où: (1) l'humain imite le robot pour l'aider à apprendre. Dans ce cas, le robot développe la capacité à reconnaître l'expression faciale de l'autre et donc à prédire l'état interne du partenaire. (2) le robot imite l'humain afin d'adapter son comportement en fonction de ce qui l'entoure. Dans ce contexte, l'humain transmet des signaux émotionnels que le robot est capable de reconnaître et d'utiliser pour acquérir de nouvelles connaissances et réguler son comportement.

Dans l'expérience que nous proposons pour illustrer le « social referencing », nous avons une tête de robot pouvant imiter et reconnaître des expressions faciales, un bras robotique pouvant

l'évitement de l'objet. L'expérience est illustrée par le scénario suivant. Dans un contexte nouveau pour le robot, l'humain juge agréable un objet particulier. Le comportement naturel du robot est de changer son propre état interne en passant de l'état neutre à l'état de plaisir. La valence émotionnelle de l'objet est associée à une valence positive qui était neutre à l'origine. Cette valence permet au robot de réguler son propre comportement en atteignant et/ou manipulant l'objet. Au contraire, si l'humain exprime une expression négative, la valence de l'objet devient négative ce qui induit un comportement d'évitement pour le robot. La régulation des signaux internes du robot et l'adaptation de son comportement sont amorcées par l'interaction émotionnelle.

5. DISCUSSION

Dans cet article, nous avons montré comment les comportements de bas niveau d'imitation et de reconnaissance des expressions émotionnelles peuvent être obtenus en suivant des principes de modélisation relativement simples. De plus, nous avons montré comment ces deux comportements peuvent être combinés pour produire la capacité à utiliser le référencement social, c'est-à-dire combiner « imiter » et « être imité » pour obtenir un comportement dont les apprentissages futurs dépendent des retours émotionnels de l'accompagnateur. Un des points les plus intéressants de ce travail est qu'aucune des architectures présentées ne possède de module dédié à la reconnaissance de l'autre, ni de module dédié aux interactions sociales. Il n'y a pas de modèle ou de théorie de l'esprit, seulement une architecture dont les actions et les apprentissages sont dédiées à maintenir les équilibres entre ses différentes perceptions (vision, proprioception, commande, *etc.*).

Comment, dans ce cas, cette architecture rend-elle possible l'obtention de comportements qui, mis bout à bout, évoquent une mini séquence développementale ? Nous pensons que l'avantage de notre conception réside justement dans le fait de ne pas proposer d'éléments qui chercheraient à simplifier l'environnement, ou à éviter tout problème de perception entre ce qui est vu et ce qui reconnu. En d'autres termes, c'est précisément parce que notre système n'a pas assez d'information pour résoudre l'ambiguïté de la perception, que le fonctionnement homéostatique provoque la mise en place d'un comportement d'imitation : le comportement d'imitation est le seul possible qui permet d'équilibrer la perception de notre robot avec les variations de l'environnement (les mouvements de l'humain). De la même manière, la reconnaissance des expressions faciales est le seul résultat permettant la convergence du système imitant-imité, et l'équilibre entre ce qui est perçu et ce qui est ressenti sous la seule condition que l'accompagnateur agisse la plus grande partie du temps (statistiquement) comme un miroir. Dans ces deux cas, nous rejoignons la proposition faite par Lenay et collègues (Lenay 2010) sur le fait qu'il est nécessaire que le « corps perçu » et le « corps percevant » soient en décalage et que c'est spécifiquement ce décalage et la motivation d'équilibrer ces deux perceptions (corps perçu vs corps percevant) qui provoque des comportements sociaux et des apprentissages possédant des implications émotionnelles. Nous pensons par exemple que dans nos architectures, l'information V_c (la vision) correspond à l'information dominante dite du « corps percevant », tandis que la proprioception correspond naturellement au « corps perçu ». Dans ce cas, les équations 1 à 8 montrent que tout homéostat muni d'action tendra à essayer d'équilibrer le corps perçu avec le corps percevant par le moyen du comportement d'imitation.

Dans notre approche et celle de Lenay, les modèles des agents sont vus comme les constituants d'un système global « imitant-imité », lui-même vu comme un système autopoïétique (Mataruna et Varela 80) dans lequel actions (imitation) et apprentissages (les associations entre les variables internes et la vision de l'environnement) permettent d'assurer la régulation

et l'équilibre du système global. Dans cette boucle, le signal émotionnel devient un des éléments les plus importants du réseau pour maintenir l'interaction au travers de l'expression, de l'imitation et du mirroring.

Il est à noter que cette vision autopoïétique du développement nous amène à des contradictions avec les littératures des deux principales disciplines qui alimentent nos travaux, en psychologie du développement et en intelligence artificielle. Dans les deux cas, les résultats que nous obtenons nous poussent à envisager de manière inverse les relations causales et les prérequis nécessaires à l'obtention des comportements décrits. En psychologie du développement, notre modèle est en rupture avec l'idée que le référencement social est un processus cognitif *complexe* qui est le produit d'une relation triadique où les deux agents et l'objet sont clairement *définis*. De la même manière, en intelligence artificielle, notre modèle est en rupture avec la vision classique qui présente la reconnaissance des émotions comme dépendante d'une analyse descendante nécessitant dans l'ordre, la reconnaissance de l'autre, puis la reconnaissance du visage de l'autre pour en extraire l'émotion exprimé par ce visage pour enfin en déduire l'action à exécuter. A l'inverse, nos résultats montrent qu'imitation et reconnaissance des émotions de l'autre peuvent être vues comme des comportements qui émergent de la dynamique de la boucle imitant-imité globale, sans nécessiter de reconnaissance des visages, ni d'analyse des postures du bras ou plus généralement de reconnaissance de l'autre. Pour aller plus loin, nos résultats suggèrent, que les comportements d'imitation de bas niveau seraient plutôt un prérequis qui permettrait de détecter des changements de dynamique perception-action qui, à leur tour, pourraient permettre de différencier l'autre de soi. De la même manière, nos résultats tendent à montrer que la reconnaissance des expressions émotionnelles pourrait conduire à un état d'équilibre global de la boucle qui permettrait, *ensuite*, d'effectuer un apprentissage et une reconnaissance du visage de l'accompagnateur : « ce » qui se place en équilibre avec moi durablement pourrait être appris comme un « objet utile » à reconnaître et à discerner pour retrouver à l'avenir cet état d'interaction et d'équilibre global. Cela ouvrirait, par l'action et la caractérisation des dynamiques de l'agent, la perspective de pouvoir discerner les états favorables à l'apprentissage de l'autre. Ce travail met en évidence que la cognition sociale incluant le référencement social, pourrait avoir une dimension émotionnelle plus forte et un besoin moindre de mécanismes cognitifs de haut niveau qu'on ne le suppose habituellement. Certains auteurs qui étudient les précurseurs du référencement social chez les primates (Bard 2012) semblent du même avis.

Bien sur, notre modèle est loin de couvrir tous les aspects de l'imitation et du référencement social. Dans nos travaux, plusieurs points essentiels allant des formes plus élaborées d'imitation pour apprendre (Demeris 2002, Calinon 2007, Calinon 2010), à l'attention conjointe (Nagai 2007) qui est une capacité importante du référencement social, ne sont pas traitées.

D'autres auteurs (Breazeal 2004, Thomaz 2013) se sont aussi intéressés à des aspects de référencement social dans des expériences robotiques. Cependant, ces modèles ne prennent pas en compte le caractère fondamental de l'ambiguïté de la perception et par conséquent possèdent de nombreux apriori destinés à affiner et simplifier l'environnement pour qu'il corresponde aux actions du robot. En conséquence, les comportements que proposent leurs modèles sont impressionnants et riches lorsque la majorité des paramètres sont contrôlés, mais présentent en parallèle un déficit d'adaptation plus marqué que nos modèles et une généralisation moindre.

Notre approche offre suffisamment de souplesse pour développer d'autres capacités cognitives comme l'attention conjointe (Boucenna 2011). Dans le cadre du « social referencing », le robot développe un vocabulaire rudimentaire se limitant à « bien » ou « pas bien » correspondant respectivement à l'expression faciale positive et négative. (Tomasello

1983) souligne l'existence d'un lien étroit entre l'attention conjointe et l'acquisition du vocabulaire à 18 mois. Nos travaux en cours montrent l'acquisition d'un vocabulaire plus riche en utilisant les mécanismes mis en évidence dans ce papier. Notre approche est générique pour deux raisons: (1) développement et acquisition de compétences différentes et (2) les entrées sensorielles peuvent être de nature différentes (vision, audition, tactile, proprioception).

Nos travaux futurs consisteront à prendre en compte comment nos architectures pourraient conserver un pouvoir explicatif des résultats obtenus par nos collègues, notamment dans ces travaux en robotique qui ont comme objectif la coopération homme-robot dans des tâches complexes. Notre principale interrogation se situe dans le rôle de l'ambiguïté de la perception, moteur du « développement » de nos proto-comportements. Dans ce cas, la question peut se poser de la manière suivante : « jusqu'à quel niveau de comportement peut-on aller en conservant un système qui tire partie de l'ambiguïté de la perception ? ». Encore une fois, l'expérience proposée pour Fournier et Jeanneord, décrit en section 1., ainsi que les expériences de Lenay, nous confortent dans le fait que des mécanismes similaires à nos architectures sont toujours à l'œuvre chez l'adulte. Néanmoins il faut garder à l'esprit que la particularité de ces expériences est de replacer l'adulte dans un contexte d'expérience et de sensations limités et dégradés. Nous pensons que le déficit qui s'ouvre à nous réside dans la capacité à conjuguer (1) des principes de construction qui tirent partie de l'ambiguïté de la perception pour l'émergence de comportements sociaux nouveaux, (2) tout en capitalisant sur les dynamiques sensori-motrices engendrées par un système qui parvient à atteindre l'équilibre en situation de perception ambiguë. Sur ce dernier point, nous pensons ainsi que la caractérisation des dynamiques sensori-motrices (par exemple les erreurs détectées par l'homéostat, ou bien la différence de temporalité entre les informations sensorielles et les prédictions de ces informations) permettrait à l'agent de différencier les contextes environnementaux (par exemple de différencier une situation de babbling ou l'on est seul, d'une situation d'imitation ou l'on est avec un autre, simplement parce que la dynamique de ses propres gestes est différente). Ainsi, « faire l'expérience » du comportement d'imitation deviendrait un outil permettant de détecter des différences de dynamiques internes, et donc des situations où, avec des gestes très simple, le système pourrait faire la différence entre une interaction où seul lui-même est impliqué, versus une situation où un autre agent l'est. Il s'agirait d'un point de départ vers la différenciation de soi avec l'extérieur, un peu comme le jeune bébé qui différencie le retour de ses propres actions dans un miroir avec un retour similaire par la forme et le mouvement (ambigu), mais légèrement différent dans sa temporalité quand il est produit par un autre (Gergely 2001). En complément, un soin particulier doit être porté sur l'étude de l'émergence des mécanismes attentionnels, qui pourraient permettre de choisir à la fois les zones d'intérêt et permettre de déclencher les comportements appropriés, mais aussi de construire des catégories sensori-motrices liées à l'interaction avec l'autre. Ainsi, le développement autonome d'un robot ne peut être envisagé qu'à travers des interactions avec l'environnement. Sans cette capacité à interagir avec l'environnement physique et social, le robot ne peut finalement pas agir et le développement de capacités cognitives semble difficile. Particulièrement, la notion d'agent autonome est valable si et seulement si l'agent, son environnement et leurs interactions sont pris en considération (Maillard 2005). L'ensemble de ces interactions pourra faire émerger la notion d'agentivité (se savoir auteur de ses propres actions).

6. ANNEXE

Les unités de traitement V_{pred} et ISP réalisent toutes les deux une catégorisation des vecteurs d'entrée sous la forme d'un conditionnement simple, pris comme exemple dans la dernière ligne de la table 1. Nous allons reprendre ici le détail de cet algorithme de conditionnement appliqué à V_{pred} (et donc respectivement le même pour ISP) étape par étape.

L'unité de traitement V_{pred} possède deux entrées : V_c et P_c . Par construction, V_c est notée comme étant l'information inconditionnelle : les coefficients entre V_c et V_{pred} sont une matrice Identité (I) qui permet de transmettre à V_{pred} l'intégralité de l'information de V_c . V_{pred} et V_c possèdent la même dimension.

P_c est noté comme étant l'information conditionnelle : les coefficients entre P_c et V_{pred} sont une matrice W , générée aléatoirement, ou bien nulle au début de l'algorithme. Dans le premier cas l'activité de P_c génère du bruit, dans le second (plus répandu) l'activité de P_c ne génère pas de réponse de la part de V_{pred} .

6.1 Mise a jour

La mise a jour de V_{pred} est la suivante

$$V_{pred} = I.V_c + W.P_c$$

Au début de l'utilisation de l'unité V_{pred} , nous observons que P_c n'a pas d'impact sur la réponse de V_{pred} (W étant nulle), tandis que la présence de V_c implique une recopie du vecteur V_c en sortie de V_{pred} .

6.2 Apprentissage

En cas de concomitance temporelle des informations V_c et P_c , un apprentissage de type « conditionnement » est déclenché. La concomitance des informations est un prérequis à tout apprentissage hebbien, induisant des modifications synaptiques permettant la modification du traitement de l'information, c'est à dire un apprentissage, tel qu'observé par Donald Hebb (Hebb, 1949). Plus précisément, la règle d'apprentissage est une minimisation de l'erreur au sens des moindres carrés (Least Mean Square – LMS-, proposée par Widrow et Hoff dans le domaine des réseaux de neurones, Widrow et Hoff, 1960) :

$$\Delta W = \varepsilon.P_c.(W.P_c - V_c.I)$$

La modification des coefficients de W fait tendre le produit $W.P_c$ vers le produit $V_c.I$. I étant la matrice identité, la modification des coefficients s'effectue donc de manière à réduire l'erreur entre $W.P_c$ et V_c .

Il est a noter qu'il s'agit d'un apprentissage itératif, avec une valeur de ε volontairement très basse (entre 0.01 et 0.2, selon la vitesse d'apprentissage souhaitée). Cela permet par exemple de moyenner les coefficient de W dans l'hypothèse ou plusieurs vecteurs P_c doivent être associés avec un même vecteur V_c : dans ce cas, la réponse après apprentissage de V_{pred} sera (selon la règle de mise à jour) le prototype des valeurs moyennes des différents P_c correspondant au même V_c . Le réseau réalise ainsi une catégorisation des vecteurs P_c selon le nombre de catégories de références V_c .

6.3 Compétition

La plupart du temps, la sortie d'une unité effectuant une catégorisation est rehaussée par une dernière étape de compétition, afin de diminuer le bruit induit par le caractère non orthogonal des échantillons d'entrée (P_c). Tout type de fonction de compétition peut être envisagée d'un simple opérateur max des valeurs du vecteur V_{pred} , ou un rehaussement par la fonction exponentielle (plusieurs maximum possibles).

6.4 Algèbre des systèmes cognitifs

l'ensemble des trois étapes de calcul décrites en 6.1, 6.2 et 6.3 est synthétisée (et grandement simplifiée) par l'écriture suivante :

$$V_{pred} = c(V_c \cdot I, W \cdot P_c)$$

qui indique que la sortie de l'unité de V_{pred} est calculée selon la règle de mise à jour qui dépend de V_c , W , P_c et dans une moindre mesure I , suivie d'une étape de compétition c . Le résultat du calcul dépend lui même fortement de W , qui joue le rôle de mémoire à long terme des modification successives opérées pendant l'apprentissage.

5. REFERENCES

Andry P., Gaussier P., Moga S., Banquet J.P., Nadel J. (2001) The dynamics of imitation processes: from temporal sequence learning to implicit reward communication, *IEEE Trans. on Man, Systems and Cybernetics Part A: Systems and humans*, 31 (5), 431—442.

Andry P., Gaussier P., Nadel J., Hirsbrunner B. (2004) Learning Invariant Sensory-Motor Behaviors: A Developmental Approach of Imitation Mechanisms, *Adaptive behavior*, 12 (2), 115—123

Andry, P., Blanchard, A., and Gaussier, P. (2011), Using the rhythm of nonverbal human-robot interaction as a signal for learning, *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, 1, (3), 30-42.

Ashby, W.R. (1947), « Principles of the Self-Organizing Dynamic System », *Journal of General Psychology* volume 37, pages 125--128

Bonaiuto J, Arbib MA. (2010) Extending the mirror neuron system model, II: what did I just do? A new role for mirror neurons. *Biol Cybern.* 102(4):341-59.

Bard, K. (2012). Emotional Engagement: How Chimpanzee Minds Develop. F. de Waal & P. Ferrari (Eds). (2012). *The primate mind: Built to connect with other minds*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

Boucenna, S., Gaussier, P., Andry, P., and Hafemeister, L. (2010). Imitation as a communication tool for online facial expression learning and recognition. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 5323–5328. IEEE.

Boucenna, S., Gaussier, P., and Hafemeister, L. (2011, August). Development of joint attention and social referencing. In *Development and Learning (ICDL), 2011 IEEE International Conference on* (Vol. 2, pp. 1-6). IEEE.

Boucenna, S., Gaussier, P., Andry, P., and Hafemeister, L. (2014a). A robot learns the facial expressions recognition and face/non-face discrimination through an imitation game. *International Journal of Social Robotics*, 6, 633-652.

Boucenna, S., Gaussier, P., & Hafemeister, L. (2014b). Development of first social referencing skills: emotional interaction as a way to regulate robot behavior. *Autonomous Mental Development*, IEEE Transactions on, 6(1), 42-55.

Boucenna, S., Anzalone, S., Tilmont, E., Cohen, D and Chetouani, M. (2014c). Learning of social signatures through imitation game between a robot and a human partner., *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*. Vol 6 No 3 Pages 213 - 225

Boucenna, S. et al. Robots Learn to Recognize Individuals from Imitative Encounters with People and Avatars. *Sci. Rep.* 6, 19908; doi: 10.1038/srep19908 (2016)

Brun, P. and Nadel, J. (1997). Les jeunes enfants face aux émotions. *Revue de Psychologie de l'éducation*, 2:75–86.

Bruner, J. S. (1983). *Le développement de l'enfant: savoir faire, savoir dire*. Presses universitaires de France.

Butterworth G (1999) Neonatal imitation: existence, mechanisms and motives. In: Nadel J, Butterworth G (eds) *Imitation in Infancy*, Cambridge: Cambridge University Press, pp 63–88

Byrne, R. and Russon, A. (1998), Learning by imitation: a hierarchical approach, *Behavioral and Brain Science*, 21, 667–721

Breazeal, Cynthia (2004), Working collaboratively with humanoid robots. In : *Humanoid Robots*, 2004 4th IEEE/RAS International Conference on. IEEE, 2004. p. 253-272.

Calinon S, Guenter F, Billard A (2007) On learning, representing and generalizing a task in a humanoid robot. *IEEE Trans Syst, Man, Cybern B Special issue on robot learning by observation, demonstration and imitation* 37(2):286–298

Calinon S, D'halluin F, Sauser E, Caldwell D, Billard A (2010) Learning and reproduction of gestures by imitation: an approach based on Hidden Markov Model and Gaussian Mixture Regression. *IEEE Robot Autom Mag* 17(2):44–54

Carpenter, G., Grossberg, S. (1987). Invariant pattern recognition and recall by an attentive self-organizing art architecture in a nonstationary world. *Proceeding of Neural Network*, 2:737–745.

Demiris, Y. (2002), Imitation, Mirror Neurons, and the Learning of Movement Sequences, in the *International Conference on Neural Information Processing (ICONIP-2002)* (Singapore), 111–115

Feinman, S. (1982). Social referencing in infancy. *Merrill-Palmer Quarterly*, 28(4):445–470.

Fournieret, P. and Jeannerod, M. (1998). Limited conscious monitoring of motor performance in normal subjects. *Neuropsychologia*, 36, 1133-1140.

Gallese, V., Fadiga, L., Fogassi, L., and Rizzolatti, G. (1996), Action recognition in the premotor cortex, *Brain*, 119, 593–609

Gallese V. (2003) The roots of empathy: the shared manifold hypothesis and the neural basis of intersubjectivity. *Psychopathology*. 2003 Jul-Aug;36(4):171-80.

Gaussier, P., Prepin, K. and Nadel, J. (2004). Toward a cognitive system algebra: Application to facial expression learning and imitation. *Embodied Artificial Intelligence*, 2004

Gaussier, P. and Zrehen, S. (1995). PerAc: A neural architecture to control artificial animals. *Robotics and Autonomous Systems* 16(2-4): 291-320.

Gergely, G., and Watson, J. S. (1999). Early socio-emotional development: Contingency perception and the social-biofeedback model. *Early social cognition: Understanding others in the first months of life*, 60, 101-136.

Gergely G (2001) Is early differentiation of human action a precursor to the one-year-old's understanding of intentionality? *Developmental Psychology* 37:579-82

Gopnik, A. M., Meltzoff, A. N., and Kuhl, P. K. (2001). The Scientist in the Crib: How Children Learn and What They Teach Us about the Mind.

Hasson, C., Gaussier, P., and Boucenna, S. (2011). *Emotions as a dynamical system: the interplay between the meta-control and communication function of emotions*. *Paladyn*, 2(3), 111-125.

Hebb, D. (1949) *The Organization of Behavior : A Neuropsychological Theory*, Wiley, New York, 1949.

Lenay, C. (2010). « It's So Touching » : Emotional Value in Distal Contact. *International journal of Design*. 4(2), 1-11.

Maillard, M., Gapenne, O., Hafemeister, L. and Gaussier, P. (2005) Perception as a dynamical sensori-motor attraction basin. In: Cap- carrre M, Freitas A, Bentley P, Johnson C, Timmis J (eds) *Adv. i n Artificial Life*, Lecture Notes in Computer Science, vol 3630, Springer Berlin Heidelberg, pp 37–46

Maratos, O. (1973). The Origin and Development of Imitation in the First Six Months of Life. Unpublished doctoral dissertation, geneva

Mataruna H., Varela F. (1980). *Autopoiesis and Cognition : The realization of the living*. Reidel, Dordrecht

Meltzoff, A. N. and Moore, M. K. (1977). Imitation of facial and manual gestures by human neonates. *Science*, 198:75–78.

Meltzoff, A. N. and Moore, M. K. (1983). Newborn infants imitate adult facial gestures. *Child Development*, 54:702–709.

Nagai, Y. (2007) "Joint Attention Learning based on Early Detection of Self-Other Motion Equivalence with Population Codes," *Journal of the Robotics Society of Japan*, vol. 25, no. 5, pp. 727-737.

Nadel, J., Prepin, K., and Okanda, M. (2005), Experiencing contingency and agency : first step toward self-understanding ?, *Interaction Studies*, 2, 447–462

Nadel, J. (2014) How imitation boosts development. Oxford University Press, London.

Nielsen, T. (1963), Volition: A new experimental approach, *Scandinavian Journal of Psychology*, 4, 225–230

Nehaniv CL, Dautenhahn K (2002) The correspondence problem. In: Dautenhahn K, Nehaniv CL (eds) *Imitation in animals and artifacts*, MIT Press, Cambridge, MA, USA, pp 41–61

Piaget, J. (1945), *La formalisation du symbole chez l'enfant : imitation, jeu et rêve, image et représentation*.

Piaget, J. (1952). *The origins of intelligence in children* (Vol. 8, No. 5, p. 18). New York: International Universities Press.

Piaget, J. (1962). *Play, Dreams and Imitation in Childhood*, New York, Norton. *La Formation du symbole chez l'enfant : imitation, jeu et rêve, image et représentation*, 1945, Delachaux et Niestlé, 1994, Lausanne, Paris, Delachaux et Niestlé

De Rengervé A., Andry P., Gaussier P. (2011). A developmental approach of imitation to study the emergence of mirror neurons in a sensory-motor controller, BIO Web of Conferences (International Conference of the European SKILLS Project), Montpellier, FRANCE, December 2011.

de Rengervé A., Boucenna S., Andry P., Gaussier P. (2010). Emergent imitative behavior on a robotic arm based on visuo-motor as- sociative memories. In: IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and systems (IROS'10), Taipei, Taiwan, pp 1754–1759

Rengervé A., Andry, P., Gaussier, P. (2015) Online learning and control of attraction basins for the development of sensorimotor control strategies, *Biological Cybernetics*, 109 (2) : 255-274.

Revel, A. and Andry, P. (2009), Emergence of structured interactions: From a theoretical model to pragmatic robotics, *Neural Network*, 22, 116–125

Russell, C., Bard, K., and Adamson, L. (1997). Social referencing by young chimpanzees (pan troglodytes). *journal of comparative psychology*, 111(2):185–193.

Schöner, G., Dose, M., and Engels, C. (1995). Dynamics of behavior: theory and applications for autonomous robot architectures. *Robotics and Autonomous System*, 16(2-4):213–245.

Thomaz, A. L., and Cakmak, M. (2013) Active social learning in humans and robots. In Kevin B. Clark, editor, *Social Learning Theory: Phylogenetic considerations across animal, plant, and microbial taxa*. Nova Publishers, New York, NY, 2013.

Thorndike, E. L. (1898). Animal intelligence: an experimental study of the associative processes in animals. *The Psychological Review: Monograph Supplements*, 2(4), i.

Trevarthen, C. (1993). The function of emotions in early infant communication. in J. Nadel and L. Camaioni (Eds.), *New perspectives in early communicative development*. London, U. K.: Routledge.

Tomasello, M. and Todd, J. (1983). Joint attention and lexical acquisition style. *First language*, 4:197–212.

Tomasello, M., Carpenter, M., Call, J., Behne, T., and Moll, H. (2005), Understanding and sharing intentions: the origins of cultural cognition., *Behavioral and Brain Sciences*, 28, 5, 675–691; discussion 691–735

Uzgiris, I. C. (1999), Imitation as activity: its developmental aspects, in J. Nadel and G. Butterworth, eds.,

Imitation in infancy, 187–206

Vygotski, L. S. (1935). *Pensée et langage*, trad. F. Sève, Paris: La Dispute.