HAL
open science

Cognition, Affects et Interaction

Gérard Bailly, Sylvie Pesty

To cite this version:

Gérard Bailly, Sylvie Pesty (Dir.). Cognition, Affects et Interaction. pp.88, 2016. cel-01258860v2

HAL Id: cel-01258860

https://hal.science/cel-01258860v2

Submitted on 8 Feb 2016

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.

Master Recherche **IC2A**
Ingénierie de la Cognition, de la Création et des Apprentissages

Master Recherche Sciences Cognitives

Travaux d'études et de recherche 2015-2016

pour le cours :
Cognition, Affects et Interaction

Gérard Bailly & Sylvie Pesty

Université de Grenoble-Alpes, France

Avant-propos

Cet ouvrage rassemble les travaux d'études et de recherche effectués dans le cadre du cours « Cognition, Affects et Interaction » que nous avons animé au 1er semestre 2015-2016. Cette deuxième édition de cours poursuit le principe inauguré en 2014 : aux cours magistraux donnés sur la thématique "Cognition, Interaction & Affects" qui donnent les outils méthodologiques des composantes de l'interaction socio-communicative, nous avons couplé une introduction à la robotique sociale et un apprentissage actif par travail de recherche en binômes. Le principe de ces travaux d'études et de recherche est d'effectuer une recherche bibliographique et de rédiger un article de synthèse sur un aspect de l'interaction homme-robot. Si plusieurs sujets ont été proposés aux étudiants en début d'année, certains binômes ont choisi d'aborder l'interaction avec un angle original qui reflète souvent les trajectoires de formation variés des étudiants en sciences cognitives (ingénierie, sociologie, psychologie, etc). Le résultat dépasse nos espérances : le lecteur trouvera une compilation d'articles argumentés de manière solide, rédigés de manière claire et présentés avec soin. Ces premières «publications» reflètent les capacités singulières de réflexion de cette promotion en nette augmentation par rapport à l'année précédente. Nous espérons que cette série d'ouvrages disponibles sous HAL puisse servir de point d'entrée à des étudiants ou chercheurs intéressés à explorer ce champ de recherches pluri-disciplinaire.

Gérard Bailly
Directeur de Recherches CNRS
GIPSA-Lab, Univ. Grenoble-Alpes/CNRS
email : gerard.bailly@gipsa-lab.fr

Sylvie Pesty
Professeur des Universités UPMF
LIG, Univ. Grenoble-Alpes/CNRS
email : sylvie.pesty@imag.fr

Précédents ouvrages

Cognition, Affects et Interaction *Gérard Bailly & Sylvie Pesty* 2015 cel-01110281 (pdf)

Table des matières

Articles en français **1**

Synchronisation fine d'activité. Serrer la main à un robot *David Rideau, Xavier Sargentini & Jean-Loup Gilis* 1

Un robot avec de la personnalité : théorisation et implémentation *Frédérique Francillon & Erwan David* 9

Revue de la robotique pour l'enfant *Alexia Roux-Sibilon & Emilie Ginestet* 17

Entre agent robotique et agent virtuel, lequel Choisir ? *Melissa Pothier & Solène Lyon* . . 29

Robotique et interfaces cerveau-machine : un état de l'art *Alex Jardillier & Marc-Aurèle Rivière* 37

Robotique industrielle *Jean Tornier & Guillaume Leroy* 45

Introduction à l'apprentissage développemental *Gaël Vila & Léopold Guertin* 53

L'Intelligence Artificielle au service de l'art génératif. Approfondissement dans l'art pictural à travers l'exemple du projet eDavid *Yves Brozat & Antoine Grimaldi* 61

Articles en anglais **67**

Social Presence of Smart Spaces *Lucien Bobo & Louise Charpentier* 67

Social Robotics and Technology Acceptation *Alban Flachot & Kevin Parisot* 71

Compliance is the new key word for biomimetic robots *Damien Schnebelen & Sélène Petit* 81

Index **87**

Synchronisation fine d'activité

Serrer la main à un robot

Rideau David
Master IC2A AST
Grenoble INP Phelma
Grenoble, France
David.Rideau@phelma.grenoble-inp.fr

Sargentini Xavier
Master IC2A Sciences cognitives
Grenoble INP Phelma
Grenoble, France
Xavier.Sargentini@phelma.grenoble-inp.fr

Gilis Jean-Loup
Master IC2A Sciences cognitives
Grenoble INP Phelma
Grenoble, France
Jean-Loup.Gilis@phelma.grenoble-inp.fr

***Abstract* — Dans cette revue de la littérature nous étudions la poignée de main et son implémentation en robotique sociale. Nous revenons sur le contexte historique et le rôle social de la poignée de main chez l'Homme. Nous décrivons l'étude d'A. Melnik sur la cinématique de la poignée de main humaine, qui utilise un gantelet doté de capteurs. Ces données comportementales humaines ont permis l'établissement de modèles pour la poignée de main robotique. Nous reprenons les mesures réalisées sur des poignées de main entre humain et bras robotique. Les méthodes employées pour évaluer ces modèles sont inspirées du test de Turing ou basées sur les réponses de participants à des échelles. Nous abordons également l'importance d'autres facteurs tels les expressions faciales dans la perception de la poignée de main. Nous concluons sur, d'une part, la faisabilité de la poignée de main entre humain et robot avec les moyens actuels et, d'autre part, sur la nécessité d'implémenter les produits de la recherche sur des plateformes plus complexes que le simple bras robotique.**

***Keywords* — Poignée de main, interaction homme-robot, bras robotique, synchronisation**

I. Introduction

Les robots sociaux, et plus particulièrement les robots dits "compagnons" sont un sujet de recherche en pleine expansion. Confrontés à une population vieillissante et à un marché du travail compétitif, le fait de pouvoir se reposer sur une main d'œuvre robotique pour certaines tâches comme l'aide aux personnes ou la garde d'enfant devient attractif. Les progrès technologiques de ces dernières années, avec le développement de Nao et Pepper par la société Aldebaran par exemple, font du robot compagnon un futur proche et bien réel.

La question de l'acceptabilité est centrale au déploiement de compagnons robots. Davis [1] décrit l'acceptabilité comme fonction de la perception de l'utilité et de l'utilisabilité d'une nouvelle technologie. Un moyen d'augmenter l'utilisabilité du compagnon robot est de le doter de comportements sociaux adaptés à l'interaction avec l'humain. Un exemple est la poignée de main.

Mais rendre un robot capable de serrer la main est loin d'être trivial. Dans cette revue de la littérature nous nous attachons à décrire le rôle de la poignée de main dans les interactions entre humains, à décrire les premiers travaux avec des bras robotiques, et à explorer le rôle des expressions faciales dans les interactions humain-robot.

II. La poignee de main chez l'homme

A. Contexte historique

Au travers des vestiges archéologiques qui remontent jusqu'au VIIème siècle avant J.C. et qui nous sont parvenus aujourd'hui [2], nous avons la preuve que, depuis très longtemps, la poignée de main représente un acte symbolique pour les êtres humains.

Dans la Grèce antique, la poignée de main symbolisait un signe de bienvenue, dans l'Europe médiévale, un témoignage de confiance.

Par le simple fait que la main tendue ne peut tenir une arme, la poignée de main porte un profond message de paix et de respect mutuel que les êtres se témoignent l'un à l'autre.

On peut également trouver plusieurs exemples de poignées de main politiques [2] qui scellent des réconciliations ou des accords entre des gouvernants.

La poignée de main a été analysée par différents travaux de recherche [3] pour étudier la signification non verbale qu'elle contient sur le plan de l'interaction sociale. Ainsi, elle peut être révélatrice de la relation qu'entretiennent des personnes entre elles, ou ritualiser une entrée en contact, ou la clôture d'un échange, manière de se dire bonjour et au revoir. Elle sert aussi à féliciter ou remercier, ou encore à conclure un accord, une embauche, ou marquer un signe d'allégeance.

Sur le plan politique, en campagne, l'homme politique sert des poignées de main pour signifier au peuple qu'il est proche de lui, et qu'il est accessible. A l'inverse, le peuple se sent honoré d'avoir pu approcher une personnalité d'assez prêt pour lui serrer la main.

Aujourd'hui, sur le plan économique, la poignée de main témoigne de la conclusion d'un accord dans lequel chacun trouvera son intérêt à travailler ensemble. Mais il se pose aussi la question de savoir à quel moment et à qui on sert la main [3], quel est celui qui en est l'initiateur, quel est l'objectif sous-jacent de l'acte lorsqu'il y en a un, ou lorsqu'il ne s'agit que d'une simple convention sociale.

Elle comporte de multiples variations dans la séquence gestuelle qui deviennent ainsi le signe d'appartenance à un même groupe social [3], jusqu'à pouvoir représenter un code secret dans différentes confréries secrètes, où la manière de serrer la main ne doit jamais être révélée à des personnes extérieures au groupe.

Elle peut impliquer toute la main, ou les deux mains par recouvrement, parfois un seul doigt, mais toujours avec cette obligation de l'établissement d'un contact physique, et donc d'un rapprochement suffisant pour y parvenir.

Ainsi, bien que l'acte puisse être purement formel, il nécessite inévitablement l'établissement d'un contact physique, ce qui, en terme de proxémie, amène chacun à laisser entrer l'autre dans son périmètre et à mettre en jeu l'un des sens les plus intimes, à savoir le toucher.

Derrière cet acte tantôt anodin, tantôt symbolique, il y a donc autant matière à exprimer qu'à ressentir, à affirmer ou à subir, avec une grande part d'inconnue quant à la durée de cet échange tactile. Elle est donc porteuse d'un métalangage par lequel chaque être révèle ou donne à voir quelque chose de lui-même qui engage au minimum la main, mais bien souvent l'ensemble du corps dans l'approche ainsi que le regard.

Les comportements non verbaux qui accompagnent une situation relationnelle entre deux personnes sont révélateurs de leur degré d'ouverture réciproque, de leur degré d'intimité, de leur rapport de force et de pouvoir. Dans sa thèse [4], Jennifer Huwer mentionnent que les personnes tendent à se fier davantage à ce registre non verbal qu'aux mots réels pour évaluer la confiance qu'ils vont porter à l'autre, et le degré de vérité de ce qu'ils disent.

Dans ce registre non verbal, le contact physique tient une place très importante, car il est généralement le signe d'une acceptation de l'autre dans son environnement proche. Et si la poignée de main comporte une dimension sociale, elle sera également interprétée sur le plan non verbal pour enrichir la perception de l'autre et permettre de se situer de manière plus pertinente dans cette interaction sociale.

On trouve dans les manuels de savoir-vivre, une définition de la bonne et de la mauvaise poignée de main [3], celle qui d'un côté est ferme et brève, avec le coude ouvert, et de l'autre celle qui manque de vitalité, qui s'éternise inutilement, ou n'offre à serrer que le bout des doigts.

Il y a également un manque de consensualité sur l'usage à adopter entre personnes de sexe opposé, selon qu'on se réfère à une vision à dominante masculine, qui ordonne à l'homme de tendre la main à une femme, ou à l'inverse qui offre la liberté de choix à la femme de daigner tendre la sienne à l'homme [3]. La subtilité peut aller jusqu'à préconiser à la femme de se laisser serrer la main par l'homme plus fort qu'elle ne sert la sienne.

La poignée de main s'opère donc en fonction de conventions sociales qui régissent aussi bien la manière de toucher que les règles spécifiques à différents groupes et situations contextualisées. Parfois, elle sera réalisée de manière totalement inconsciente, automatique et convenue, n'apportant guère d'éléments à la situation d'échange. Dans d'autres situations, elle portera une lourde charge symbolique et pourra être sujette à beaucoup d'interprétations, à la fois par les deux personnes qui se serrent la main, mais également par ceux qui en sont les témoins.

Dans la plupart des cas, cet échange tactile, bien que de courte durée, influencera consciemment ou non le rapport entre les personnes et selon qu'elle aura lieu en début d'échange ou à la fin, ou les deux, elle fera quoiqu'il en soit partie intégrante de la relation globale entre les personnes.

Que ce soit pour se faire connaître ou reconnaître, se mesurer, s'affirmer, faire la paix ou conclure des accords, l'aspect rituel de la poignée de main invite (ou oblige) chacun à rencontrer l'autre, et participe ainsi fortement des liens sociaux que l'être humain est amené à entretenir avec ses pairs, en l'inscrivant dans une dimension systémique chère à Edgar Morin [5], où c'est l'interaction entre un organisme et son environnement qui fait émerger la notion de boucles d'échanges, d'une pensée complexe [5] qui sert à tisser des liens, à relier, notions reprises dans la théorie énactive de la cognition de Francisco Varela [6], où il n'y a pas d'action sans perception, et réciproquement.

B. Rôle social de la poignée de main

La main tendue est à la fois une proposition et une demande de réciprocité [3]. Il est généralement convenu de répondre à la proposition par l'affirmative, et dans le cas inverse, l'interprétation du refus se révèle surprenante et socialement embarrassante, laissant l'initiateur dans une position très inconfortable, qui peut l'amener à réagir violemment devant ce refus. Souvenons-nous de cette anecdote d'un ancien président français qui, devant le refus qu'il essuie de la part d'une personne s'énerve et l'insulte [7].

En outre, si une poignée de main réussie engage les deux parties dans une confiance mutuelle, à l'inverse, une poignée de main désynchronisée, ou vécue comme incohérente par les deux personnes se révèlera également porteuse de sens. Ainsi, pour être correctement vécue par les deux personnes, la poignée de main implique un séquencement de gestes d'approches, de synchronisation, de contact, puis de séparation.

La fermeté, la chaleur et l'intensité d'une poignée de main témoignent du degré de présence que les deux personnes s'accordent à cet instant précis de l'échange.

Au-delà de l'indication sociale, c'est aussi un rapport de force physique qui peut s'exprimer entre deux personnes, où chacun n'est pas forcément en mesure de répondre à la poignée de main avec la même vigueur, ce qui permet une prise de position ascendante de l'un sur l'autre, qui ne signifie pas forcément une opposition, mais plutôt une intention de dominer dans l'échange, parfois de manière inconsciente.

D'autres facteurs tactiles seront pris en compte par chacun, chaleur ou froideur de la main, sécheresse ou humidité, douceur ou rugosité. Nous en tirons des conclusions sur l'autre, et parfois des expressions populaires comme "main froide, cœur chaud".

L'ethnologue André Leroi-Gourhan [8], explique au sujet du passage de l'être humain à la station verticale, que celui-ci a ainsi développé conjointement le langage et le geste, en présentant la face du visage à ses homologues, et en libérant le membre antérieur pour développer la préhension, en plus de la locomotion. Grâce à cette analyse, on comprend mieux le lien étroit qui s'établit entre deux êtres par l'échange d'un contact physique synchronisé entre leurs deux mains, expression au moins aussi forte et peut-être même plus que les mots eux-mêmes.

C. Rythmique et cinématique de la poignée de main

Les caractéristiques quantitatives de la poignée de main humaine sont mesurées depuis la fin des années 70. Mais ces mesures avaient comme interface l'ordinateur ou un bras robotique et ne mesuraient pas la poignée de main entre deux personnes. Dans sa thèse A. Melnyk [2] propose une paire de gants *(figure 1)* qui permet la caractérisation de la poignée de main entre deux personnes, par la mesure de l'accélération, de la force, de la durée et de la vitesse angulaire.

Figure 1. Deux sujets portant les gants

Avec les résultats qui ont été obtenus, l'interaction peut être décomposée en 4 phases :

- Start of Handshaking : le contact visuel est établi et les personnes rapprochent leurs mains.
- Physical Contact : le contact physique est établi, la synchronisation de leurs mouvements commence de façon inconsciente.
- Mutual Synchronisation : les mouvements sont mutuellement synchronisés et la poignée de main est stable.
- End of Handshaking : le contact physique est interrompu et les mains se replacent librement vers le corps des sujets.

Lors de la poignée de main, il y a une synchronisation mutuelle. Cette synchronisation se met en place dans la phase Physical Contact (PhS) et se stabilise durant la phase de Mutual Synchronisation (MS). Pendant la phase de PhC, les fréquences sont réparties autour de 3.2 Hz puis le mouvement s'accélère pour se stabiliser à une fréquence d'environ 4 Hz lors de la phase de MS *(figure 2)*. L'amplitude des mouvements entre les deux phases ne change pas.

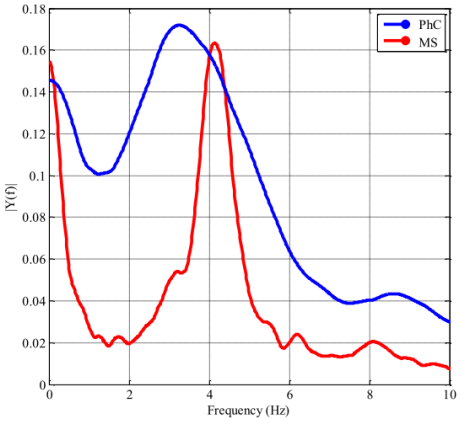


Figure 2. Moyenne des spectres (FFT) pour la phase PhC et la phase MC

Deux aspects permettent de caractériser la poignée de main : la durée et le type. Pour ce qui est de la durée, elle va varier suivant le contexte [4] : consolation, félicitation, salutation, adieu/merci, acceptation et rituel. La plus longue étant significativement celle de la consolation par rapport à toutes les autres (1,9 sec maximum) *(figure 3)*. Il y a également une différence de durée suivant le sexe, les femmes font durer la poignée de main plus longtemps que les hommes. La durée va aussi augmenter avec le degré d'intimité avec la personne, pour être significativement plus long avec quelqu'un de proche qu'avec un inconnu ou quelqu'un qu'on n'aime pas.

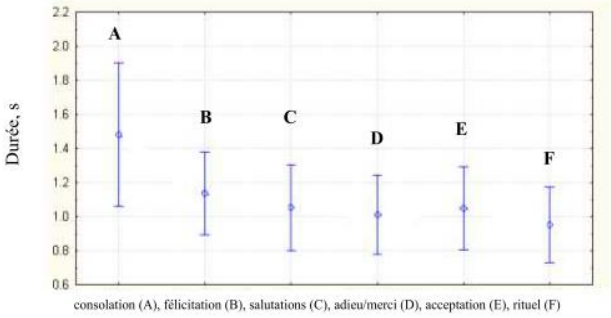


Figure 3. Effet du contexte sur la durée de la poignée de main

Ensuite la poignée de main peut être caractérisée suivant 5 types :

- “single pump” : un seul mouvement de va-et-vient.
- “multiple pump”: plusieurs mouvements de va-et-vient.
- “squeeze”: aucun mouvement vertical ou horizontal.
- “hand-on-hand pump”: mouvements de va-et-vient simple ou multiple avec la main gauche qui vient recouvrir la poignée de main.
- “hand-on-hand squeeze”: aucun mouvement vertical ou horizontal avec la main gauche qui vient recouvrir la poignée de main.

Pendant une poignée de main, le type va être utilisé suivant le rapport qu’on veut établir avec le partenaire de la poignée de main et la durée va être fonction du degré d’intimité et de l’empathie

III. Modèle chez le robot

A. *Modèle bio-inspiré de bras robotique*

D’un point de vue neurobiologique, les mécanismes neuronaux qui contrôlent les mouvements rythmiques sont situés entre la moelle épinière lombaire et cervicale. Ils seraient les même pour les membres supérieurs et les membres inférieurs [2].

Le mécanisme de mouvements rythmiques est un ensemble d'interneurones et de neurones moteurs (oscillants) qui se trouvent dans la moelle épinière. Ces neurones contrôlent localement la séquence de contraction et la relaxation de muscles. Sur les interneurones agissent des neurones sensoriels qui fournissent des informations proprioceptives et extéroceptives. Ils détectent l'étirement, la contraction des muscles, les forces internes et les positions articulaires (proprioceptives) et également les interactions avec l’environnement (extéroceptif).

1. *Bras robotique Katana bio-inspiré [2]*

Pour le bras Katana *(figure 4)*, chaque axe est contrôlé séparément: le contrôle est décentralisé. Cela signifie que les entrées de commande de chaque articulation ne dépendent que de la mesure du déplacement et de la vitesse de cette articulation. Le bras est équipé de différents capteurs:

- inertiels, pour l’accélération articulaire
- de vitesses
- de positions articulaires
- de forces via les valeurs du courant mesuré

Ces paramètres mesurés permettent d'organiser le retour sensoriel du générateur de rythme et peuvent être utilisés pour l’apprentissage. Le bras manipulateur est fixé à une table est orienté vers l’Homme pour commencer l’interaction.

Figure 4. Bras robotique Katana

Une plage de fréquence moyenne été déterminée pour le bras manipulateur. L’interaction rythmique entre l’être humain et le robot sera compris entre 0,2 Hz et 1,1 Hz. Les résultats obtenus avec ce bras robotique sont les suivants.

Durant la 1ère phase SoH, le robot tend le bras et attend l’interaction. L’Homme en face du robot tend la main (durée de 9 secondes), le modèle de neurones est dans un état “plateau”. La seconde phase PhC commence, l’Homme prend le bras du robot et initie le mouvement, cela permet au modèle de neurone de passer d’un état “plateau” à un état “oscillateur”. Le mécanisme d’apprentissage de la rythmicité est mis en marche (durée de 12 secondes). Une fois la fréquence apprise, on continue dans la phase MS où le bras manipulateur s’adapte au changement de rythmes de l’être humain, cette phase dure 25 sec avec une fréquence quasi-stable. Pour terminer, l’interaction physique s’interrompt, c’est la phase EoH. Le modèle de neurone repasse à un état “plateau” et reste donc immobile. *(figure 5)*

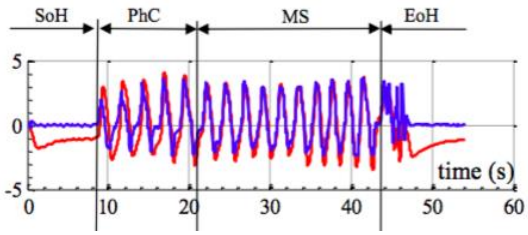


Figure 5. Exemple de synchronie entre le bras robotique en rouge et la force injectée par l’Homme en bleue

Ce qu’on peut remarquer c’est l’augmentation du temps qui passe de 2-3 secondes pour une interaction Homme-Homme à plus de 30 secondes pour une interaction Homme-robot. C’est dû à la vitesse limité du robot pour sécuriser l’interaction.

2. *Bras robotique par Jindai [9]*

Ce bras robotique *(figure 6)* a été fabriqué sur la base de la taille moyenne d'un bras humain et a été doté de 4 degrés de liberté (poignet, coude et 2 pour l'épaule). Un capteur magnétique est utilisé pour calculer les positions de la main droite, épaule droite et des chevilles de l'être humain. Un laser permet de mesurer la distance entre le robot et l'humain. Chaque articulation est contrôlée par un servomoteur, le temps de réponse du système est de 5 ms pour que le robot puisse suivre la position désirée.

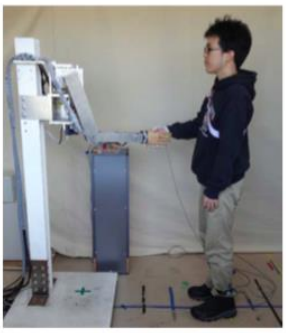


Figure 6. Bras robotique de Jindai

3. *Poignée de mains par téléprésence (Nao) [10]*

La poignée de main est réalisée entre un humain et le robot humanoïde Nao. Nao est contrôlé par un humain grâce à une manette de Nintendo Wii reliée par Wifi. Nao est utilisé pour la poignée de main avant une tache de négociation (acheteur/vendeur) par téléprésence. *(figure 7)*

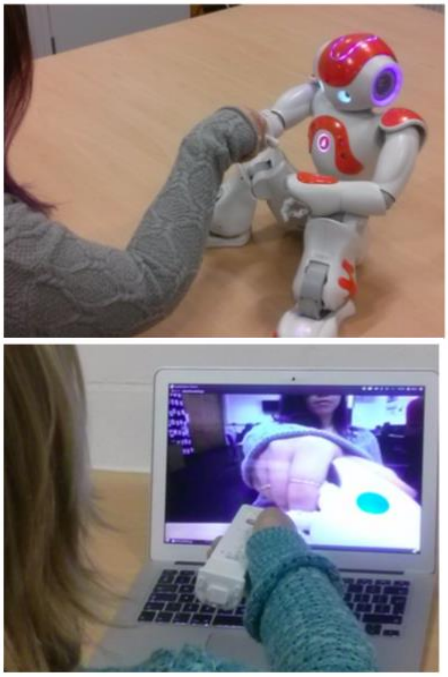


Figure 7. Illustration de la tâche mise en place

Ils ont montré que la poignée de main est importante et qu'elle n'a pas besoin d'être exactement comme celle de l'humain mais qu'elle est juste symbolique. Lors de la téléprésence, le fait d'avoir une poignée de mains entre le l'acheteur et le robot avant la négociation améliore celle dernière que ce soit avec une réaction du robot à la poignée de main ou sans réponse du robot.

B. *Interaction Homme-robot*

Serrer la main à un robot peut paraître déroutant, et l'objectif des chercheurs est de rendre cette expérience la plus naturelle et la moins désagréable possible. Pour ce faire, l'approche dominante consiste à donner à la poignée de main robotique des caractéristiques les plus ressemblantes possibles à celle de la poignée de main entre humain.

De la même manière qu'un test de Turing permet de savoir si un chatbot produit une discussion assimilable à une discussion entre humains, il existe un « test de Turing de la poignée de main ». Développé par Avraham et al. [11] il consiste à utiliser un bras robotique qui peut être téléopéré, c'est à dire contrôlé par un utilisateur humain, ou contrôlé par un programme de poignée de main. Le juge saisit le bras robotique et entame un mouvement de poignée de main. Chaque essai de ce test consiste en deux poignées de main, et le juge doit déterminer laquelle paraît la plus « humaine ». Chaque essai est réalisé face à un humain dont le bras est caché par un écran et qui opère aussi un bras robotique. Le juge ne sait pas si la force exercée par le bras robotique avec lequel il est en contact est issue de la téléopération par l'humain face à lui ou par un programme. Une photographie de la configuration matérielle du test est présentée en figure 8

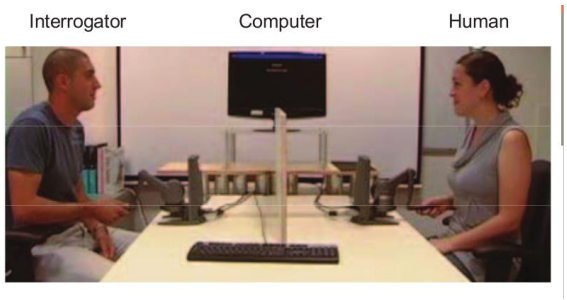


Figure 8. Configuration du test de Turing de la poignée de main.

Cette méthode a été utilisée pour comparer des modèles de poignée de main robotique, avec un bras robotique à un degré de liberté, et a l'avantage de pouvoir être employée avec des bras robotiques plus complexes dont le mouvement n'est pas limité à une seule dimension.

Néanmoins, le test de Turing a pour désavantage de supposer que l'objectif du robot est d'avoir un comportement le plus proche possible de celui de l'humain. Or les attentes de l'humain lorsqu'il entreprend une interaction avec un robot ne sont pas forcément les mêmes que lors d'une interaction humain-humain. Un robot trop semblable à l'humain peut mettre mal à l'aise. Cette idée est résumée par Masahiro Mori

[12] qui évoque une “vallée troublante”. Plus un robot est semblable à l'humain plus notre sentiment de familiarité est fort, mais passé un certain point la familiarité décroît fortement, au point que nous nous sentons mal à l'aise (*figure 9*).

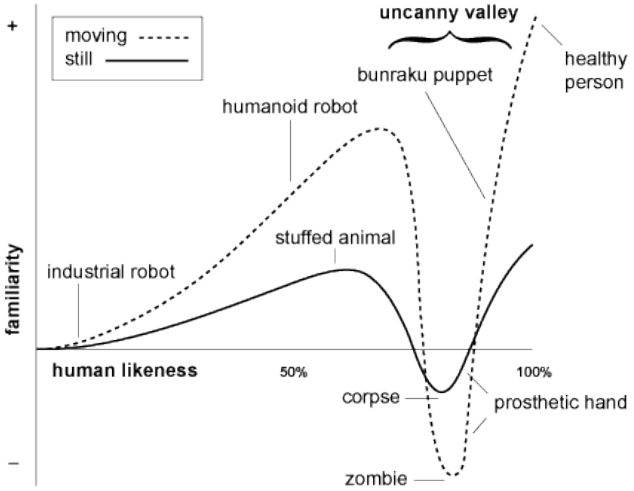


Figure 9. La “vallée troublante” de Mori. Lorsque la ressemblance à l’humain est trop forte, sans être parfaite, le sentiment de familiarité décroit au point de nous mettre mal à l’aise. L’effet est particulièrement prononcé pour les objets animés.

Une autre approche consiste donc à évaluer la poignée de main non pas sur sa stricte similitude avec le comportement humain mais également sur des caractéristiques plus subjectives. Jindai [9], dans une expérience de poignée de main entre humain et bras robotique, intégrant non seulement la poignée de main mais aussi la phase d'approche, utilise une échelle en 7 points :

- Facilité/confort de la poignée de main
- Facilité/confort du mouvement de réponse à une requête de poignée de main
- Facilité/confort du mouvement de requête de poignée de main
- Sécurité
- Politesse
- Vitalité

Dans cette expérience le bras robotique présenté en *figure 6* est utilisé. Le bras robotique et le participant commencent à 3m l'un de l'autre. Le participant approche alors le robot. Deux cas sont possibles : si le participant entreprend un mouvement de requête de poignée de main le robot répond à la requête. Sinon le robot requiert une poignée de main. L'objectif de la requête est de mettre en place une interaction incarnée (*embodied*). Le modèle développé par Jindai est basé sur la réplication des comportements de poignée de main humain-humain par le robot et donne des résultats positifs sur les 7 points de l'échelle (*figure 10*).

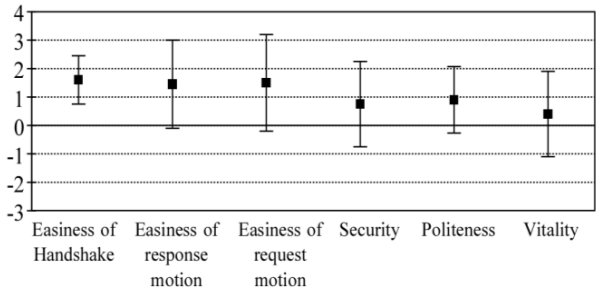


Figure 10. Les notes moyennes et les écart-types donnés par les participants de l’étude de Jindai et al. aux poignées de main robotiques pilotées par un modèle inspiré de l’humain.

Ces données suggèrent que l'humain répond plutôt bien à des comportements de poignée de main robotiques inspirés des comportements humains.

C. Ajout d’expresions faciales

Plusieurs travaux de recherche portent sur la combinaison des expressions faciales et des sensations tactiles [13] afin d’étudier l’impact que cela peut avoir sur la perception émotionnelle.

Le but est d’enrichir l’échange qui a lieu entre le robot et l’homme, en utilisant le robot humanoïde Meka doté d’expressions faciales, notamment au niveau des lèvres, ce qui apporte une information non verbale parfaitement interprétable par l’homme.

Certaines émotions sont en effet perceptibles dans les expressions faciales, d'autres dans la posture du corps, d'autres dans la voix. Les chercheurs ont donc demandé aux participants d'évaluer selon le canevas IIT (Information Integration Theory) les émotions qu'ils perçoivent dans l'interaction avec le robot. L'importance du toucher a été clairement démontrée dans la perception émotionnelle, ce qui n’est pas étonnant quand on sait que la peau contient des récepteurs lié au plaisir.

Mais il est intéressant de noter que les émotions à valeur positive sont plus facilement reconnues dans les expressions faciales, et qu’à l’inverse les émotions violentes sont plus perceptibles dans le contact tactile. Si la combinaison des deux ne facilite pas la reconnaissance dans un sens ou dans l'autre. On peut juste noter que lorsque le toucher vient renforcer une émotion positive, cela améliore la qualité globale de la relation.

Les travaux dans ce domaine n’en sont qu’à leur début compte-tenu du peu de possibilités offertes aujourd’hui par la technologie pour reproduire toute la richesse d’expression du visage humain.

IV. Conclusion

Les travaux récents ont montré que la poignée de main est une interaction humain-robot techniquement réalisable. Si dans un contexte d'achat-vente par téléprésence la poignée de main avec une interface robotique revêt un caractère principalement symbolique, les modèles inspirés de la poignée de main humain-humain développés notamment par Jindai et collègues donnent des résultats encourageants et laissent espérer un réel contact social entre humain et robot compagnon autonome.

La limite principale de ces travaux est la simplicité des plateformes utilisées : un robot-compagnon n'est pas forcément un bras robotique muni d'un haut-parleur. Les challenges de demain porteront sur l'intégration de comportements sociaux sur des plateformes plus complexes, par exemple humanoïdes. L'importance de la posture, des expressions faciales et de la mobilité n'est pas moindre dans le ressenti que l'humain a d'une poignée de main. Le robot compagnon du futur devra être capable d'intégrer ce comportement à tout un panel de comportements sociaux, devra être capable de choisir entre la poignée de main et d'autres formes de salutations ou marques d'accord, et devra être capable de s'adapter intelligemment à la réaction de l'humain qui lui fait face.

La collaboration avec les sciences sociales sera sans-doute centrale dans le développement des modèles d'interactions humain-robot et dans la mise au point d'outils permettant au robot d'évaluer les réactions humaines à une tentative de comportement social robotique.

Ces avancées dans la mise en place de comportements sociaux/symboliques laissent entrevoir un robot qui se détache de son étymologie tchèque *robota* (travail, besogne) pour prendre une vraie place dans la vie quotidienne.

References

[1] F. D. Davis, « Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology », MIS Quarterly, vol. 13, n° 3, p. 319-340, 1989.

[2] A. Melnyk, « Perfectionnement des algorithmes de contrôle-commande des robots manipulateurs électriques en interaction physique avec leur environnement par une approche bio-inspirée », Université de Cergy-Pontoise, Cergy-Pontoise, 2014.

[3] P. M. Hall et D. A. S. Hall, « The Handshake as Interaction », Semiotica, vol. 45, n° 3-4, 1983.

[4] J. Huwer, « Understanding handshaking : the result of contextual, interpersonal and social demands », 2003.

[5] E. Morin, « Science avec conscience ». Fayard, 1982.

[6] F. Varela, E. Thompson, et E. Rosch, « The Embodied Mind: Cognitive Science and Human Experience ». MIT Press, 1991.

[7] mays6700, « Casses-toi pauv' con ! Nicolas Sarkozy » https://www.youtube.com/watch?v=Eau5_Gi3icQ. 2012.

[8] A. Leroi-Gourhan, « Le Geste et la Parole - tome 1 ». Bibliothèque Albin Michel.

[9] M. Jindai, S. Ota, Y. Ikemoto, et T. Sasaki, « Handshake request motion model with an approaching human for a handshake robot system », in 2015 IEEE 7th International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM), 2015, p. 265-270.

[10] C. Bevan et D. Stanton Fraser, « Shaking Hands and Cooperation in Tele-present Human-Robot Negotiation », in Proceedings of the Tenth Annual ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction, New York, NY, USA, 2015, p. 247–254.

[11] G. Avraham, I. Nisky, H. . Fernandes, D. . Acuna, K. . Kording, G. . Loeb, et A. Karniel, « Towards perceiving robots as humans – three handshake models face the Turing-like Handshake test », IEEE Transactions on Haptics, p. 196-207, 2012.

[12] M. Masahiro, « The Uncanny Valley », Energy, vol. 7, n° 4, p. 33-35, 1970.

[13] M. Y. Tsalamlal, M.-A. Amorim, J.-C. Martin, A. Tapus, et M. Ammi, « Affective Handshake with a Humanoid Robot: How do Participants Perceive and Combine its Facial and Haptic Expressions? », in International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction (ACII), Xi'an, China, 2015.

Un robot avec de la personnalité :
théorisation et implémentation

Frédérique Francillon & Erwan David
Master Sciences Cognitives, INP - Grenoble, France

[Frederique.Francillon, Erwan.David]@phelma.grenoble-inp.fr

Abstract — Dans cette revue, nous présentons comment il est possible de donner de la personnalité à un robot. Cette ambition qui pouvait s'approcher de la science fiction autrefois commence de plus en plus à devenir réalité. Différentes méthodes peuvent être suivies afin de rendre ce projet réalisable que nous présentons. Via des exemples de robots dotés de personnalité nous mettons en évidence l'importance que celle-ci peut avoir, notamment dans la facilitation des interactions humain-robot. Le robot devenant de plus en plus humain et étant de plus en plus présent dans différentes sphères de nos vies, que ce soit par exemple dans le milieu éducatifs, du divertissement ou encore au service de personnes âgées.

Index Terms — robot, traits de personnalité, modèle de personnalité, implémentation, revue

I. Introduction

Les robots ne seront bientôt plus ce qu'ils étaient. Pour la majorité des individus la réalité de la robotique est un bras robotisé industriel dans une chaîne d'assemblage, cela semble encore bien éloigné des Robots androïdes imaginés par Isaac Asimov ; bien que moins intelligents (voire tout juste balbutiants) les robots font pourtant leur arrivée dans le monde domestique de monsieur et madame tout le monde. Mais ce changement de paradigme ne décrit pas seulement l'arrivée des robots dans nos maisons, mais leur rapprochement par rapport aux humains de manière générale ; que ce soit chez soi, au travail ou encore dans les lieux publics. En effet, précédemment, tout était fait pour que les robots industriels soient séparés des humains, de sorte que l'un ne blesse pas l'autre et que l'autre ne gêne pas le premier. La révolution se fait aujourd'hui du domaine industriel vers des robots apportant leur aide au côté des humains, que ce soit par l'assistance des personnes âgées, ou bien par un rôle d'aide domestique ou encore de divertissement.

C'est ainsi que le robot devient social [1]. Cette promiscuité au sein de la société et de la vie humaine requiert de ces nouveaux agents qu'ils possèdent une personnalité ou, en tout les cas, qu'ils soient capables de faire croire qu'ils en possèdent une. Cela dans le but que, à travers l'acceptabilité qu'en aura la société, leur utilisation et insertion soient facilitées. Par certains aspects, l'implémentation d'une personnalité artificielle est démesurément difficile, mais par d'autres cela peut être très facile. Pour expliquer la première partie de cette dichotomie facétieuse il faut comprendre que nous considérons comme acquis de nombreux éléments constituants de notre vie en société ; ces mêmes éléments, cependant, que nous sommes prompts à remarquer chez les objets artificiels dès lors qu'ils leurs font défaut. En tant qu'humain nous sommes capables d'exprimer notre personnalité propre et d'identifier intuitivement celle de nos semblables à partir de paroles, d'émotions ou encore de comportements. De manière plus précise, des auteurs ont proposer d'implémenter une personnalité en faisant varier des éléments tels que : le mouvement [2], la démarche [3], le regard [4] ou encore les émotions présentées [5].

La description faite précédemment illustre combien la tâche peut être difficile. Pourtant, d'un autre côté, elle peut être très aisée. En effet, un phénomène nommé *Media Equation* [6] décrit la propension dont chacun nous faisons preuve à traiter les ordinateurs comme des entités sociales, et cela en leur attribuant des traits de personnalité et en réagissant envers eux comme nous pourrions le faire envers un semblable. Rosenthal-von der Pütten et collaborateurs [7] expriment bien cela à travers les travaux de Arvid Kappas [8], ajoutant : « Kappas aptly claimed that humans are "free monadic radicals", who are so eager to interact and form relationships with other social beings that they cannot help but act in a

similar way towards artificial entities such as robots or virtual agents » (p.3). Ce phénomène est une potentielle base facilitant la reconnaissance de personnalité chez un robot, car il est de surcroît facilité par le taux d'anthropomorphisme de l'appareil (que ce soit physiquement ou comportementalement) [9]. On peut néanmoins observer ses limites dans une réplication de la fameuse étude de Milgram [10] par Bartneck et collaborateurs [11] dans laquelle le sujet recevant une décharge électrique est ici un robot ; l'étude démontrant que bien que l'on puisse, par certains côtés, considérer ce dernier comme un être social il n'en reste pas moins que nous n'avons absolument pas pour eux les mêmes considérations que nous avons pour un autre être humain. Nous avons ici écrit exclusivement à propos d'émuler la personnalité humaine, mais il est par ailleurs important de préciser qu'il existe de nombreuses recherches, présentant des résultats très encourageant, utilisant des robots représentant des animaux (iCat [12] [13], the Huggable [14], ANTY [15]) ou même des constructions physiquement plus proches du pilier que de l'être humain (INDIGO [16]).

Dans le but de présenter un état de l'art concernant la personnalité en robotique nous commencerons pas présenter la personnalité telle que décrite en psychologie ; puis nous exposerons différentes approches prises dans la théorisations de la personnalité pour son application à la robotique ; nous finirons en exposant des exemples existants d'implémentations.

II. Pourquoi donner de la personnalité à des robots ?

Comme indiqué précédemment, les robots tendent de plus en plus à sortir du milieu industriel (bras automate sur les chaînes de montages dans l'industrie automobile ou militaire) pour venir dans nos maisons, parmi nous, humains.

Nous vivons dans une société vieillissante ayant un besoin croissant d'aide à domicile, aussi bien dans les tâches ménagères que dans l'aide à la personne. Mais aussi dans le milieu hospitalier, éducatif, des divertissements… Les robots sont vus comme étant LA solution à ce besoin [2], [17], [18]. Les robots étant donc amener à interagir directement avec l'humain, il semble primordial de leur donner des caractéristiques ressemblant à l'humain pouvant permettre son intégration [19].

Il existe deux théories [20] qui s'opposent pour expliquer l'attraction qu'on peut avoir envers un agent (humain ou robot). La première est la *similar attraction theory* indiquant qu'une personne sera plus attirée par une personnalité similaire à la sienne. La seconde, opposée à la première, prédit qu'une personne sera plus attirée par une personnalité étant complémentaire à la sienne : c'est la *complementary attraction theory*. Différentes études ont montré que l'une et l'autre de ces théories pouvaient se vérifier mais sans que cela soit gravé dans le marbre. Il apparaîtrait que la théorie de la similarité entrerait en jeu quand on interagit avec des agents désincarnés et que la seconde se vérifierait plutôt dans les interactions avec des agents incarnés.

La personnalité d'un individu nous renseigne lors d'un échange sur ce qu'il pense et sur ses états mentaux en général. Dans une expérience mettant en scène le robot AIBO [21], l'implémentation d'une personnalité rend l'interaction plus agréable. De plus, les sujets de l'expérience indiquent leur préférence d'interagir avec la version du robot ayant de la personnalité plutôt qu'avec celle en étant dépourvu. Les robots n'étant plus vus comme de simples outils mais bien comme des compagnons à part entière, ils sont considérés comme ayant une présence, c'est-à-dire que leur nature virtuelle n'est plus prise en compte. La présence sociale en particulier, permet de considérablement améliorer les interactions humain-robot [19].

Le fait de donner de la personnalité permettrait donc de grandement faciliter les échanges humain-robot [2], [4], [22]. En effet, pouvoir accéder à l'état émotionnel d'un robot permettrait à l'utilisateur de mieux comprendre le comportement qu'il exprime. Le robot perdrait de sa nature robotique pour gagner en humanité. Le robot est d'ailleurs vu comme étant plus amical, plus utile et surtout cela faciliterait son intégration dans la société [2]. L'importance de donner de la personnalité aux robots sociaux est présentée dans une expérience menée par Kishi et collaborateurs [2]. Dans cette étude, en utilisant le même robot capable de se mouvoir et d'exprimer des émotions, celui-ci a pour tâche de localiser un objet qu'un agent humain tient dans sa main et selon la distance à laquelle il se trouve de s'approcher de l'objet et donc de l'humain. Différentes conditions ont été testées dont une où le robot peut se déplacer mais n'affiche aucune émotion. Les sujets ne pouvaient donc pas deviner les

intentions du robot, ils ont ensuite rapporté qu'ils le trouvaient quelque peu effrayant. Cette étude a montré que pouvoir se déplacer était un point majeur chez un robot, de même que pouvoir afficher des émotions était crucial pour des interactions humain-robot. Donner de la personnalité à un robot permet à l'utilisateur de prédire le comportement, les actions qu'il fera et donc de garder un certain contrôle sur la situation et l'agent artificiel.

III. LA PERSONNALITÉ

La littérature en psychologie concernant les théories et modèles de la personnalité est extrêmement abondante et diverse. Au sein de celle-ci nous présentons succinctement ici trois modèles basés sur les traits de personnalité. Pour commencer, le modèle dit *Big Five* [23], [24], celui-ci recense cinq facteurs :

- Extraversion : considéré comme le trait de personnes ayant confiance en elles, étant plutôt extraverties.
- Agréabilité : le fait de ressentir agréablement les émotions positives que les autres perçoivent, comme l'amour, l'admiration et la compassion. Mais de moins ressentir les émotions négatives envers les autres comme la haine, le ressentiment, la colère, la malveillance.
- Ouverture à l'expérience : le fait d'être non-conventionnel, de ne pas accorder de valeurs à des actions ou des événements. Être moins dans une attitude de jugement. Les personnes affichant ce trait sont par ailleurs moins sensibles aux émotions telles que la fierté, la honte, l'admiration et le reproche.
- Névrosisme : associé aux personnes anxieuses et tristes. Les gens possédant ce trait ressentiraient plus intensément les émotions négatives et moins intensément les émotions positives.
- Consciencieux : associé à l'assurance et à la fierté ; ce trait engendre généralement des sensations plus fortes en relation avec des émotions comme la gratification.

Le modèle de Myers-Briggs (MBTI) [25] est lui basé sur les théories des types de Carl Jung et rend compte des facteurs suivants :

- Extraversion/introversion : indique dans quel sens on dirige notre énergie, si c'est vers le monde extérieur (extraversion) ou si c'est vers ses pensées, son « monde intérieur » (introversion).
- Sensation/intuition : précise le type d'informations sur lequel on se base, si ce sont des faits, des certitudes (sensation) ou si ce sont des idées, des possibilités (intuition).
- Pensée/sentiment : indique la manière de prendre des décisions ; si elles sont basées sur la logique et l'analyse (pensée) ou sur des valeurs que l'on peut accorder aux choses, qui dépendent de ce que l'on pensent et de ce que l'on croit (sentiment).
- Jugement/perception : précise le type de vie que l'on préfère ; si nous souhaitons une vie planifiée, stable et organisée (jugement), ou bien si nous maintenons une certaine flexibilité (perception).

Ce dernier modèle de personnalité se base sur trois dimensions majeures. Ce modèle créé par Eysenck est appelé *the three factors model* ; il est, par certains aspects, proche du Big Five. Il est particulier en cela qu'il s'inspire de la biologie afin d'expliquer les trois *super-facteurs* PEN impliqués dans sa description de la personnalité [26] :

- Psychotisme : est associé aux niveaux de testostérone et implique des traits de personnalité comme l'agressivité, l'impulsivité et la rébellion
- Extraversion : s'inspire de la balance entre l'inhibition et l'excitation neuronale ; l'extraversion est mesurable via la conductance de la peau
- Névrosisme : est basé sur le seuil d'activation du système nerveux sympathique (prépare le corps à l'action, se déclenche dans les situations d'urgence) ; correspond à la stabilité du comportement dans le temps et à la capacité d'adaptation à son environnement.

Il existe un nombre très important de modèles psychologiques de la personnalité ; des modèles théoriques allant de 3 facteurs à, dans de rares cas, plusieurs centaines [27]. Néanmoins, parmi tous ceux-ci il semblerait que le modèle du Big Five soit à ce jour le plus populaire dans l'étude et l'implémentation de personnalités robotiques [28] (voir par

exemple : [4], [5], [9], [29]–[32]), comparé au modèle Myers-Briggs [22] ou de Eysenck [26], [33].

À partir de ces modèles – choisis car présentés comme les plus cités dans la littérature qui nous concerne – nous remarquons en particulier la dualité extroversion et introversion. C'est un facteur au sein des théories de la personnalité qui est implémenté seul dans de nombreuses études. Il est aisément implémentable par des comportements tels que la distance (variable du robot par rapport à l'humain), le regard (évitement ou recherche du regard de l'humain), les mouvements (amples ou contenus), les paroles (joyeuses, engageantes, loquaces, etc.).

Les émotions sont très souvent liées à la personnalité car dans la plupart des modèles de personnalités se sont elles qui font le lien entre la personnalité et le comportement qui en témoigne [2], [34]. La personnalité jugée désirable chez un robot est, comme on peut s'y attendre, dépendante de la tâche que le robot aura à accomplir. En effet, un robot dont la fonction est de garder l'intérieur d'une maison propre [29] aura une personnalité bien différente d'un robot social dont le rôle sera d'assister, d'aider ou encore de coacher des personnes. Comme serait le cas d'un robot auxiliaire dans une maison de santé [17] ou dans un centre de rééducation [26].

IV. IMPLÉMENTATION

Vinciarelli et Mohammadi [28] définissent trois problèmes en lien avec la personnalité robotique (p.5-6). Dans un premier temps, la reconnaissance automatique de personnalité (*Automatic Personality Recognition*, APR) : la personnalité a beau être un faisceau de notions abstraites, elle est pourtant observable à travers des indices physiques (comportementaux). Ceci est par conséquent le problème inverse d'inférer à partir du comportement observable les traits de personnalités (d'un humain ou d'un robot). Le second problème est dit de perception automatique de la personnalité (*Automatic Personality Perception*, APP). L'observation des indices pré-cités sont des percepts à interpréter pour former la représentation de la personnalité de l'agent avec lequel nous avons une relation sociale ; cela se traduit dans les études par la moyenne des jugements de plusieurs experts/participants. Le dernier problème est la synthèse automatique de la personnalité (*Automatic Personality Synthesis*, APS), celui-ci est en partie une reformulation du phénomène de *Media Equation*. D'une part, c'est la tendance que nous avons à attribuer une personnalité à tout ce qui, de près ou de loin, possède des caractéristiques humaines ; d'autre part, c'est la faculté à générer les indices comportementaux qui serviront, dans le cas des robots, aux autres agents pour inférer/projeter une personnalité. Une part du problème dans ce cas est donc le choix des indices compte tenu du type ou traits de personnalité que les chercheurs souhaitent invoquer.

Comme mentionné précédemment, les émotions qui sont implémentées chez un robot via un modèle émotionnel servent à faire la transition entre la personnalité d'un robot et le comportement associé. En effet le seul moyen de connaître la personnalité d'une personne est d'observer la façon dont elle interagit dans son environnement et avec ses semblables [22], [34]. Il en va de même pour un robot. La notion de personnalité se base à l'origine sur un modèle humain, les expressions qui la soulignent également. Dans le but d'établir quelle personnalité engendrera quel comportement, il est souvent fait appel à des acteurs ou à des mimes [29], [31] . Ceux-ci doivent jouer/exprimer la personnalité à implémenter/prototyper et donner une version du comportement et des expressions faciales et corporelles qui en résultera. Les caractéristiques qui renseignent sur la personnalité sont multiples et dans le cas des robots, certaines ont été jugées plus importantes, plus pertinentes. Les robots sociaux amenés à interagir directement avec l'humain doivent être capables d'évoluer dans leur environnement [2]. Il est donc naturel que la capacité à se déplacer soit fondamentale.

Dans les interactions, la distance entre deux agents, qu'ils soient humain-humain ou humain-robot, est cruciale [2], [26], [18]. En effet l'espace personnel peut être délimité en différentes zones d'interaction : intime, personnel, social et public. Selon la relation qu'il existe entre les deux agents la zone concernée ne sera pas la même. Il est important d'implémenter ces distinctions dans la personnalité d'un robot afin d'éviter toute intrusion de sa part dans l'espace intime de l'humain avec lequel il interagit. Beaucoup de robots sont souvent implémentés avec le trait extraversion/introversion [26], [18], [20] car il est le plus simple à modéliser et surtout à faire percevoir. L'extraversion se caractérise en général par des mouvements corporels récurrents et amples, par un flot de

parole rapide, un contenu plus riche et un volume sonore important [4], [20] ; l'introversion est en revanche l'inverse de tout cela. Des indices non-verbaux tels que le regard, les mouvements de la tête et l'attention mutuelle sont aussi des indicateurs de ce trait [4].

L'étape d'implémentation peut être faite dans un 1er temps au travers d'une animation en 3D [31] qui s'avère être plus simple à créer que l'implémentation d'un robot et permet aux développeurs de créer davantage de mises en situation. De même le prototypage vidéo [29] est un moyen de tester un modèle de personnalité sans passer par une implémentation totale qui serait beaucoup plus coûteuse. Cette méthode permet, au moyen de vidéos simples, de visualiser des concepts et d'explorer différentes personnalités et comportements. L'approche du prototypage vidéo est du style *storytelling* et est un puissant outil. Cette étape permet d'affiner l'implémentation.

La validation du modèle consiste à s'assurer que la personnalité implémentée soit correctement perceptible par de potentiels utilisateurs. Elle peut se faire via des vidéos de prototype de robot ou du robot lui-même [2], [29], [31]. Dans de rares cas elle peut se faire par interaction directe avec le robot [20]. Un questionnaire est proposé aux sujets de l'expérience et ceux-ci doivent indiquer quelles émotions et quels traits de personnalité ils ont perçus chez le robot.

En résumé la création d'une personnalité chez un robot se compose de trois étapes majoritaires [35] :

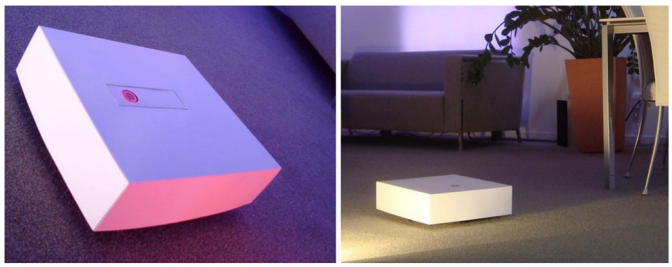
- Recherche de régularités dans le comportement humain et création de modèles de personnalité.
- Modélisation d'agents incarnés interactifs (ex : robots) dans lesquels les règles sont formalisées et implémentées.
- Évaluation des personnalités implémentées par des utilisateurs indépendants.

Robot vacuum cleaner

Les robots aspirateurs sont apparus sur le marché il y a une dizaine d'années déjà et représentent une aide, pas seulement pour des personnes ayant des difficultés à se déplacer, mais aussi pour des gens ayant un emploi du temps chargé ou tout simplement rebutant les corvées ménagères. On pourrait penser que dans le cas de robots n'ayant que peu d'interaction avec l'humain, l'implémentation d'une personnalité serait superflue, et pourtant nous démontrons avec l'étude suivante que certains utilisateurs leur attribuent des traits de personnalité désirables. Certes, cette personnalité n'est pas très complexe et n'implique pas de réelles interactions sociales avec l'utilisateur. Cependant, même pour un robot ayant une tâche relativement simple, la présence d'une personnalité est souhaitable afin d'habituer à cette nouvelle présence qu'il représente. Cela permet de créer une relation de confiance avec le robot : on lui laisse la gestion de cette tâche ménagère.

Ainsi, un premier exemple d'implémentation relativement simple est celui du robot aspirateur (*illustration 1*) développé par Hendriks et collaborateurs (Robot Vacuum Cleaner, [29]). Les auteurs s'interrogent sur l'effet que va avoir la présence domestique d'un robot de ce type et l'expérience qu'en feront les utilisateurs. Les auteurs font remarquer que la capacité des humains à anthropomorphiser un aspirateur n'est pas nouvelle, elle a déjà été observée dans le cas du Roomba. Il est en effet reporté comme commun pour ses utilisateurs de lui donner un nom et de lui attribuer des traits de personnalité particuliers, et même un genre (p.2).

Illustration



1: Exemples de scènes montrées aux participants

Dans le but de choisir des traits de personnalité pertinents pour leur robot, les auteurs se basent sur le *Big Five* et consultent six participants sélectionnés car étant de possible utilisateurs (ont un emploi du temps chargé et ont un lien avec les nouvelles technologies). Les participants rapportent qu'ils attendent du robot qu'il soit principalement calme, coopératif, efficace, routinier, poli et systématique (p.4). À partir de ces résultats, des prototypes comportementaux de ces traits ont été élaborés par scènes sous format vidéo (p.5) à partir de *role-play* premièrement enacté par des acteurs humains puis appliqué au robot.

Suivant cela, de nouveaux participants (15) ont été recrutés pour juger et donner leurs impressions du robot à partir des vidéos précédentes. Il ressort que leur expérience du robot est jugée « ennuyante », mais que, au vu de la tâche attendue, cela est acceptable. Malgré cet ennui ressenti, les personnes consultées ont, pour la majorité (14), attribué un sexe à l'aspirateur et des trait de personnalités. Cet exemple nous permet d'illustrer la force du phénomène de *Media Equation* et l'importance principale de faire concorder la personnalité du robot avec sa/ses fonction(s) principale(s).

iCat

Plus complexe, le iCat [12] (*illustration 2*) développé par Van Breemen, Yan et Meerbeek, est un robot de 38cm de hauteur possédant 13 servomoteurs qui lui permettent une certaine expression faciale (mouvement de la tête, des yeux, des sourcils, de la bouche, etc.). Il possède aussi des microphones lui permettant de déterminer dans quelle direction se trouve son interlocuteur, mais aussi une caméra dans le but de reconnaître les utilisateurs et, in fine, adapter son comportement à chacun par la création de profils personnalisés. Le choix du chat est expliqué par les auteurs comme le souhait d'augmenter son potentiel de relation social grâce à l'aspect latent « mignon » attribuable à ces félidés (p.2).

Illustration

2: Interaction entre le robot iCat et un humain.

En 2007, une étude par van Ruiten et collaborateurs [13] a eu recours à l'iCat comme camarade de jeu et assistant au service des personnes âgées au quotidien. Les auteurs ont fait varier le niveau d'empathie du robot et le niveau de contrôle perçu. Les résultats obtenus montrent qu'il n'y a pas de préférence pour un des niveaux de contrôle ou d'empathie en particulier, les personnes âgées ont une attitude positives envers cette interaction avec le robot dans toutes les conditions (p.7). Cette étude met en avant l'utilité potentielle des robots dans l'assistance et l'accompagnement des personnes âgées dans la vie de tous les jours dans le but principal de maintenir leur indépendance. Le but du robot peut être de rappeler des événements à l'utilisateur, de l'accompagner dans ses tâches domestiques, ou encore d'établir un processus de remédiation cognitive.

Post-Stroke Rehabilitation Therapy

Une dernière étude de Tapus, Tapus et Mataric, parue en 2008 [26], s'est intéressée à créer un robot social assistant les patients ayant souffert d'un AVC (*illustration 3*), et cela dans un contexte thérapeutique de réhabilitation. La personnalité du robot est établie sur un continuum extraversion/introversion, il est de même capable d'adapter ses paramètres d'interaction sociale (proxémie, rapidité, contenu verbal, etc.) en fonction des traits de personnalité du patients et de ses performances aux tâches effectuées. Les auteurs se sont inspirés des travaux sur la personnalité de Eysenck pour établir des niveaux d'extroversion du robot et établir une correspondance avec des comportements d'un côté dits « *nurturing* », opérationnalisés par une voix grave d'un volume doux, ainsi que des phrases telles que « *Very nice, keep up the good work* » ; et d'autre part, des comportements qualifiés de « *challenging* » étaient présentés par une voix aiguës avec un volume plus fort et des phrases telles que « *Concentrate on your exercise!* » (p.15). Un robot extravertie se tenait par ailleurs plus proche du sujet et se mouvait plus rapidement que celui introvertie (p.19).

Illustration

3: Photographie du robot assistant.

Cette étude permet de montrer que dans des cas précis les utilisateurs rapportent une préférence pour l'appariement de personnalité (*personality matching*) du robot par rapport à la leur ; l'adaptation comportementale du robot a eu, de plus, un effet bénéfique sur les performances du patient dans cette étude.

V. CONCLUSION

Les robots étant amenés à entrer de plus en plus dans notre vie quotidienne, il est primordial de faire en sorte que cette transition soit la plus facile possible. Partant du principe que l'homme considère intuitivement comme humain ce qui possèdent des caractéristiques avec lui-même (au sens très large), attribuer de la personnalité aux robots est un moyen proposé pour rendre son intégration dans notre société plus aisée. Cela permet d'autre part aux humains de voir davantage le robot comme un compagnon et non plus comme un outil. D'après les expériences présentées dans cette revue, il semble qu'attribuer de la personnalité à un robot ne soit pas illusoire mais bel et bien une réalité à laquelle les générations d'Hommes à venir seront confrontées. En conclusion de nos propos, nous pouvons dire que nous sortons définitivement de la science-fiction ; l'insertion des robots à nos côtés devient véritablement une question de société de première importance.

REFERENCES

[1] C. Breazeal, « Toward sociable robots », *Robot. Auton. Syst.*, vol. 42, nº 3-4, p. 167-175, mars 2003.

[2] T. Kishi, T. Kojima, N. Endo, M. Destephe, T. Otani, L. Jamone, P. Kryczka, G. Trovato, K. Hashimoto, et S. Cosentino, « Impression survey of the emotion expression humanoid robot with mental model based dynamic emotions », in *Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on*, 2013, p. 1663–1668.

[3] M. Destenhe, K. Hashimoto, et A. Takanishi, « Emotional gait generation method based on emotion mental model—Preliminary experiment with happiness and sadness », in *Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), 2013 10th International Conference on*, 2013, p. 86–89.

[4] O. Celiktutan et H. Gunes, « Computational analysis of human-robot interactions through first-person vision: Personality and interaction experience », in *Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN), 2015 24th IEEE International Symposium on*, 2015, p. 815–820.

[5] M.-J. Han, C.-H. Lin, et K.-T. Song, « Robotic Emotional Expression Generation Based on Mood Transition and Personality Model », *IEEE Trans. Cybern.*, vol. 43, nº 4, p. 1290-1303, août 2013.

[6] B. Reeves et C. Nass, *The media equation: how people treat computers, television, and new media like real people and places*, 1. paperback ed., [reprint.]. Stanford, Calif: Center for the Study of Language and Information, 1996.

[7] A. M. Rosenthal-von der Pütten, N. C. Krämer, L. Hoffmann, S. Sobieraj, et S. C. Eimler, « An Experimental Study on Emotional Reactions Towards a Robot », *Int. J. Soc. Robot.*, vol. 5, nº 1, p. 17-34, janv. 2013.

[8] A. Kappas, « My happy vacuum cleaner », in *ISRE general meeting, symposium on artificial emotions*, Bari, 2005.

[9] D. S. Syrdal, K. Dautenhahn, S. N. Woods, M. L. Walters, et K. L. Koay, « Looking Good? Appearance Preferences and Robot Personality Inferences at Zero Acquaintance. », in *AAAI Spring Symposium: Multidisciplinary Collaboration for Socially Assistive Robotics*, 2007, p. 86–92.

[10] S. Milgram, « Behavioral Study of obedience. », *J. Abnorm. Soc. Psychol.*, vol. 67, nº 4, p. 371-378, 1963.

[11] C. Bartneck, C. Rosalia, R. Menges, et I. Deckers, « Robot abuse—a limitation of the media equation », in *Proceedings of the interact 2005 workshop on agent abuse, Rome*, 2005.

[12] A. van Breemen, X. Yan, et B. Meerbeek, « iCat: an animated user-interface robot with personality », 2005, p. 143.

[13] A. M. van Ruiten, D. Haitas, P. Bingley, H. C. M. Hoonhout, B. W. Meerbeek, et J. M. B. Terken, « Attitude of elderly towards a robotic game-and-train-buddy: evaluation of empathy and objective control », in *Proceedings of the doctoral consortium, in the scope of the second international conference on affective computing and intelligent interaction (ACII2007), Lisbon*, 2007, vol. 13.

[14] W. D. Stiehl, J. K. Lee, C. Breazeal, M. Nalin, A. Morandi, et A. Sanna, « The huggable: a platform for research in robotic companions for pediatric care », 2009, p. 317.

[15] J. Saldien, K. Goris, B. Vanderborght, B. Verrelst, R. V. Ham, et D. Lefeber, « ANTY: The development of an intelligent huggable robot for hospitalized children », in *9th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, 2006.

[16] S. Konstantopoulos, I. Androutsopoulos, H. Baltzakis, V. Karkaletsis, C. Matheson, A. Tegos, et P. Trahanias, « INDIGO: Interaction with personality and dialogue enabled robots », in *18th European Conf. on Artificial Intelligence,(demos), Patras, Greece*, 2008.

[17] J. Pineau, M. Montemerlo, M. Pollack, N. Roy, et S. Thrun, « Towards robotic assistants in nursing homes: Challenges and results », *Robot. Auton. Syst.*, vol. 42, nº 3-4, p. 271-281, mars 2003.

[18] A. Tapus et M. J. Mataric, « Socially Assistive Robots: The Link between Personality, Empathy, Physiological Signals, and Task Performance. », in *AAAI Spring Symposium: Emotion, Personality, and Social Behavior*, 2008, p. 133–140.

[19] K. M. Lee, W. Peng, S.-A. Jin, et C. Yan, « Can Robots Manifest Personality?: An Empirical Test of Personality Recognition, Social Responses, and Social Presence in Human?Robot Interaction », *J. Commun.*, vol. 56, nº 4, p. 754-772, déc. 2006.

[20] M. Joosse, M. Lohse, J. G. Perez, et V. Evers, « What you do is who you are: the role of task context in perceived social robot personality », in *Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on*, 2013, p. 2134–2139.

[21] L. Moshkina et R. C. Arkin, « Human perspective on affective robotic behavior: A longitudinal study », in *Intelligent Robots and Systems, 2005.(IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on*, 2005, p. 1444–1451.

[22] A. D. Rodic, I. R. Stevanovic, et M. D. Jovanovic, « Cognitive robots of human character towards development of anthropomimetic robots with human personality », 2014, p. 141-146.

[23] O. P. John et S. Srivastava, « The big five trait taxonomy history, measurement, and theorical perspectives », in *Handbook of personality: Theory and research*, 2e éd., L. A. Pervin et O. P. John, Éd. NY: New York: The Guilford Press, 1999, p. 102-138.

[24] R. R. McCrae et P. T. Costa, « Toward a new generation of personality theories: Theoretical contexts for the five-factor model », in *The five-factor model of personality: Theoretical perspectives*, J. S. Wiggins, Éd. New York: Guilford, 1996, p. 51-87.

[25] I. B. Myers et P. B. Myers, *Gifts differing: understanding personality type*. Palo Alto, Calif: Davies-Black, 1995.

[26] A. Tapus, C. Țăpuș, et M. J. Matarić, « User—robot personality matching and assistive robot behavior adaptation for post-stroke rehabilitation therapy », *Intell. Serv. Robot.*, vol. 1, nº 2, p. 169–183, 2008.

[27] M. Zuckerman, D. M. Kuhlman, J. Joireman, P. Teta, et et al, « A comparison of three structural models for personality: The Big Three, the Big Five, and the Alternative Five. », *J. Pers. Soc. Psychol.*, vol. 65, nº 4, p. 757-768, 1993.

[28] A. Vinciarelli et G. Mohammadi, « A survey of personality computing », *Affect. Comput. IEEE Trans. On*, vol. 5, nº 3, p. 273–291, 2014.

[29] B. Hendriks, B. Meerbeek, S. Boess, S. Pauws, et M. Sonneveld, « Robot Vacuum Cleaner Personality and Behavior », *Int. J. Soc. Robot.*, vol. 3, nº 2, p. 187-195, avr. 2011.

[30] M. Brandon, « Effect personality matching on robot acceptance: effect of robot-user personality matching on the acceptance of domestic assistant robots for elderly », 2012.

[31] B. Meerbeek, M. Saerbeck, et C. Bartneck, « Iterative design process for robots with personality », in *Kerstin Dautenhahn, editeur, AISB2009 Symposium on New Frontiers in Human-Robot Interaction*, 2009, p. 94–101.

[32] D. S. Syrdal, K. Dautenhahn, S. Woods, M. L. Walters, et Kheng Lee Koay, « “Doing the right thing wrong” - Personality and tolerance to uncomfortable robot approaches », 2006, p. 183-188.

[33] S. Woods, K. Dautenhahn, C. Kaouri, R. Boekhorst, et Kheng Lee Koay, « Is this robot like me? Links between human and robot personality traits », 2005, p. 375-380.

[34] T. Doce, J. Dias, R. Prada, et A. Paiva, « Creating individual agents through personality traits », in *Intelligent Virtual Agents*, 2010, p. 257–264.

[35] C. Pelachaud et I. Poggi, « Multimodal embodied agents », *Knowl. Eng. Rev.*, vol. 17, nº 02, juin 2002.

Revue de la robotique pour l'enfant

Focus sur quatre robots éducatifs

Alexia ROUX-SIBILON
Master IC²A Sciences Cognitives
Grenoble INP
Grenoble, France
alexia.rouxsibilon@gmail.com

Emilie GINESTET
Master IC²A Sciences Cognitives
Grenoble INP
Grenoble, France
e.c.ginestet@gmail.com

I. INTRODUCTION

En ce début de 21e siècle, la recherche scientifique et industrielle porte plus que jamais son intérêt sur la robotique, et une large part de cette recherche est dédiée aux robots compagnons. Ces derniers sont développés dans des objectifs sociaux, pour permettre une interaction dans la vie quotidienne avec les usagers. Ils ne sont pas destinés à être purement utilitaires, comme les robots ménagers (e.g. robot aspirateur), ni à exécuter des tâches précises, comme des robots industriels. Le rôle des robots compagnons est réellement centré sur l'interaction avec l'usager dans la vie quotidienne. Il est destiné avant tout à *être* un partenaire, et non pas à *faire*, exécuter des tâches, comme c'est l'objectif des autres champs d'application de la robotique.

La recherche et le développement des robots compagnons ont des objectifs variés selon les besoins des utilisateurs. Il existe notamment une volonté de développer des robots destinés à interagir avec les enfants. Trois axes principaux semblent se démarquer de la littérature sur le domaine. Les robots destinés aux enfants sont d'abord envisagés dans un rôle de surveillance (robots baby-sitters, ou « robot nannies »). Le robot imaginé par les contributeurs de ce domaine de recherche serait un compagnon tenant plusieurs rôles : surveiller et sécuriser l'enfant en l'absence des parents, assurer son confort physiologique (par exemple en préparant les repas) mais aussi le divertir en lui proposant des activités ludiques. Il semblerait qu'un tel usage des robots ouvre un débat tant dans la société que dans la littérature scientifique. Sharkey et Sharkey [1] exposent un point de vue critique à cet égard. Sous l'angle de l'éthique, ils considèrent que l'introduction de robots baby-sitters pourrait porter atteinte à la vie privée des enfants. En effet, pour imaginer une relation à long terme entre un robot et une personne, il faut que le robot soit capable d'avoir une mémoire du comportement de celle-ci, afin de la reconnaître et que l'interaction soit de mieux en mieux adaptée (sur le modèle d'une relation entre deux êtres humains). Or, les auteurs exposent le problème qu'il serait ainsi possible d'enregistrer la vie entière d'un enfant – ce qui pose évidemment de nombreuses questions tant éthiques que juridiques. En outre, ces auteurs soulignent aussi que la position autoritaire inhérente aux fonctions de ce type de robot pose question. Sous un angle développemental et psychologique, l'article fait également cas d'un réel danger. En effet, les routines de soin comme donner à manger, changer les couches, donner le bain, ou veiller à ce que la chambre de l'enfant soit à bonne température pour qu'il dorme, constituent un élément clé de la relation d'attachement entre l'enfant et son *caregiver* (comme observé par les théoriciens de l'attachement[1]). Un robot ne pourrait pas être à même de détecter finement les besoins d'un jeune enfant, et d'avoir un ajustement émotionnel approprié nécessaire à l'établissement d'une routine de soin satisfaisante pour l'enfant et permettant la mise en place d'une relation d'attachement *secure*[2].

> *« No matter how good a machine is at classifying expressions or even responding with matching expressions, children require an understanding of the reasons for their emotional signal. »*

D'un autre côté, d'autres points de vue [2] envisagent que ces difficultés peuvent être dépassées, notamment grâce à des technologies comme des biosenseurs, qui permettraient

[1,2] La théorie de l'attachement décrit plusieurs styles d'attachement entre l'enfant et le *caregiver*. Une relation d'attachement *secure* se met en place lorsque le *caregiver* répond de manière appropriée et cohérente aux besoins de l'enfant. Il constitue ainsi une base de sécurité duquel l'enfant peut s'éloigner pour explorer le monde. A l'inverse, lorsque le *caregiver* peine à comprendre les besoins de l'enfant et que la relation est difficilement plaisante, un style d'attachement *insecure* se met en place, compromettant l'exploration et le bon développement de l'enfant.

d'avoir un accès plus direct à l'état cognitif et émotionnel de l'enfant. Ainsi, en plus des techniques classiquement envisagées comme le traitement de la parole ou l'analyse des mouvements et des expressions faciales, le robot pourrait recevoir des informations provenant de l'activité des muscles (électromyographie), du cœur (électrocardiographie), ou de l'activité électrodermale. Ces informations combinées pourraient ainsi fournir une base complète pour le robot, permettant à celui-ci d'offrir un comportement plus cohérent et émotionnellement approprié – autrement dit, plus « normal ».

Sous un angle tout à fait différent, d'autres recherches envisagent que les robots pourraient être bénéfiques aux enfants souffrant d'importants problèmes de santé. L'objectif serait ici de fournir un support émotionnel et social à l'enfant pour l'aider à mieux accepter son traitement et/ou son hospitalisation. Le bénéfice de la présence d'animaux de compagnie auprès d'enfants hospitalisés ou suivant un traitement a déjà été montré [3], mais pose évidemment le problème de l'hygiène au sein de structures médicalisées. Belpaeme et collaborateurs [4] ont mené une étude au sein d'un hôpital, auprès d'enfants présentant des troubles métaboliques (diabète et obésité). L'objectif était d'observer si des robots compagnons pouvaient être perçus par ces enfants comme des amis, voire même des mentors, et pouvaient contribuer à améliorer leur bien-être au sein de l'établissement ainsi qu'à les aider à mieux gérer la maladie. Les chercheurs ont programmé un robot Nao pour qu'il puisse à la fois donner des informations sur le régime spécial suivi par l'enfant, mais aussi jouer avec lui à un certain nombre de jeux. Ces activités fournissaient surtout un contexte à l'émergence d'une interaction entre l'enfant et le robot. Après trois séances d'interaction, les enfants ayant participé à l'expérience déclaraient se sentir heureux à la présence du robot. La majorité des enfants percevaient le robot comme un « ami », certains comme « un frère ou une sœur », et d'autres comme un « camarade de classe ». Très peu lui attribuaient l'adjectif de « connaissance », ou d'un « étranger ». Ces observations suggèrent qu'un robot compagnon peut constituer un réel support social auprès d'enfants qui connaissent de longues périodes d'hospitalisation ou de soins.

Enfin, un troisième enjeu important des robots destinés aux enfants pourrait être celui de l'aide aux apprentissages. Il s'agit d'un domaine inspirant ayant conduit à de nombreuses études. C'est pourquoi dans la seconde partie de cette revue, nous allons détailler quatre études qui ont fait le pari que la présence d'un robot pourrait fournir un support et une aide à l'enfant en situation d'apprentissage. Nous avons choisi de nous focaliser sur deux exemples concernant les apprentissages scolaires (apprendre les mathématiques et apprendre à écrire), et deux autres exemples concernant l'éducation responsable (apprendre à ranger sa chambre et à manger de manière équilibrée).

Les enfants sont naturellement attirés par les robots, ces agents pouvant interagir avec eux, et dans quasiment toutes les études expérimentales qui ont été menées avec des enfants, la présence des robots étaient largement acceptée. Néanmoins, on peut imaginer que l'apparence et le comportement du robot jouent un rôle crucial à la fois lorsqu'il s'agit d'aider l'enfant à apprendre, mais aussi plus directement dans le lien social ou pseudo-social qui peut s'établir entre l'enfant et le robot. Par ailleurs, on peut se demander si un tel lien est nécessaire pour qu'un robot puisse aider un enfant à apprendre. Dans les quatre situations que nous allons détailler, nous nous attacherons, à la lumière de ces problématiques, à analyser les mécanismes par lesquels les robots peuvent être bénéfiques à l'enfant lors d'un apprentissage.

II. Les robots dans le cadre de l'apprentissage scolaire

A. *Présentation*

Chaque élève est différent et devrait pouvoir apprendre à son rythme mais celui-ci est bien souvent imposé par le groupe-classe et surtout par les progressions. Pourtant, les difficultés d'apprentissage sont réelles et même si elles sont diagnostiquées de plus en plus tôt, les enseignants ont peu de temps et de moyens pour pouvoir y remédier. Certains chercheurs se penchent donc sur la conception de robots éducatifs (souvent appelés robots compagnons pour apprendre). Ces robots, qui n'ont pas vocation à remplacer l'enseignant, ont pour objectif principal d'aider l'enfant à remédier à ses difficultés et/ou à renforcer ses connaissances. L'enfant ne considère pas le robot comme un professeur supérieur à lui ; il n'est donc pas forcément conscient qu'il est en situation d'apprentissage.

Comme le montre le tableau 1, de nombreux robots ou applications technologiques permettent d'utiliser l'intelligence artificielle et les nouvelles technologies en milieu scolaire. Malheureusement, il faut reconnaître qu'équiper tout un groupe scolaire en matériel high-tech nécessite de gros moyens financiers, souvent impossibles à supporter pour une école.

Utilities	Types		
	Pure Toy	**Education and Recreation**	**Purpose on Demand**
Application Domain	Entertainment	Education and Entertainment	Scientific Research & Special Scenarios
Form	Humanoid, Animal, Vehicle form	Humanoid, Animal, Biped, Vehicle form	Various / Multiform
Movement	Walk, Crawl, Fly	Walk, Crawl, Fly	Walk, Crawl, Fly, Special type
Multimedia Function	Piezo Buzzer, Speaker, Mono LCD	Piezo Buzzer, Speaker, Mono LCD	Piezo Buzzer, Speaker, Mono / Color LCD
Sensor / Plug-in Module	Infar Ray(IR), Sound, Touch, Acceleration	IR, Light, Sound, Touch, Acceleration	IR, Light, Sound, Touch, Video, Acceleration, GPS, Text-to-Speech…
Number of Joints	Few	Normal	Many
Control Method	IR, Build-in Controller	Cable, IR, Bluetooth, Zigbee	Cable, IR, Bluetooth, Zigbee, Wi-Fi…
Re-Assemble Level	Low	Normal	High
Re-Programming Level	Low (build-in function)	Normal	High
Price Range	USD$ 50~1500	USD$ 100~2000	USD$ 5000~300000 or more expensive
Some Manufacturer	Wowwee, SONY, Kondo, Bandai	LEGO	MOBILEROBOTS

Tableau 1 : Issu de l'article [5]. Présentation de différents domaines d'application des robots éducatifs.

Les robots éducatifs peuvent être de réels assistants-professeurs, comme dans le cas des robots professeurs de langue étrangère [6] [7]. Certains d'entre eux sont plutôt des compagnons, des assistants-élèves qui sauront les guider ou encore adapter leur comportement au niveau de l'élève.

Dans cette partie, nous avons choisi de ne pas développer les robots assistants-professeurs pour nous concentrer sur deux exemples de robots compagnons utilisés en milieu scolaire qui illustrent mieux le lien enfant-robot.

B. Développer la logique et le raisonnement mathématique

a. Objectif

Les matières scientifiques et, plus particulièrement les mathématiques, bénéficient, à tort, d'une mauvaise réputation. Jugées trop difficiles mais surtout trop abstraites, les élèves semblent vite découragés par ces matières. Il n'est pas rare d'entendre un élève dire qu'il n'aime pas les mathématiques parce qu'il n'y arrive pas. Redorer le blason des matières scientifiques se résumerait alors, en toute logique, à rendre plus compréhensibles ces disciplines.

Barker et Ansorge apportent, dans leur étude de 2007 [8], une conclusion intéressante : le groupe d'élèves ayant travaillé sur le kit LEGO Mindstorms et ayant programmé le robot ainsi construit à l'aide du langage de programmation ROBOLAB, augmentent significativement leurs résultats relativement au groupe contrôle. Ils concluent que l'apprentissage assisté par un robot a développé la curiosité et les capacités des élèves en matière de résolution de problèmes.

Dans la suite de cette partie, nous allons développer l'étude de Wei et collaborateurs [5] qui utilise le kit LEGO Mindstorms NXT afin de développer une compétence mathématique jugée indispensable : la multiplication.

b. Fonctionnement du robot et besoins matériels

Pour les besoins de l'expérience, le robot LEGO Mindstorms NXT est déjà monté et prêt à fonctionner. Mais, ce robot-jouet bipède seul ne peut pas être efficace. Pour le devenir, il faut ajouter des éléments que nous allons séparer en deux catégories : les éléments hardware et les éléments software. Les chercheurs appellent l'ensemble de ces éléments le Joyful Classroom Learning System (JCLS).

Les éléments principaux de la partie hardware du JCLS sont : le robot LEGO Mindstorms NXT, un capteur sensoriel RFID (Radio-Frequency Identification), un ordinateur portable (Laptop), un afficheur mobile et un réseau sans-fil (Wi-Fi). Le tableau 2 présente les différentes fonctions et des exemples équivalents pour chaque élément.

La partie software est représentée par : l'agent de contrôle et l'agent de coordination. Ce dernier prend en charge cinq modules (notification, son, effet, mouvement, instruction et présentation).

Element	Example	Function
Robot learning companion	LEGO MINDSTORMS NXT*, Wowwee Robosapien, and Aldebaran Robotics Nao	Interaction
Sensing input device	Barcode, RFID*, QR Code, Electronic pen, and Laser projector keyboard	Input
Mobile computation unit	Laptop*, OLPC, Netbook, PDA, Smartphone, iPhone and iPad	Processing and storage
Mobile display device	Embedded display in the RLC*, Portable projector, Touch screen, Electronic paper, and Eye screen	Output
Wireless local network	Bluetooth, Wi-Fi*, ZigBee, and GroupNet	Data exchange

*Tableau 2 : Présentation des fonctions et des exemples de références pour chaque élément composant la partie hardware du JCLS. Les référence comportant un astérisque * représentent celles utilisées pour l'expérience.*

La figure 1 donne une vue d'ensemble de l'organisation du JCLS.

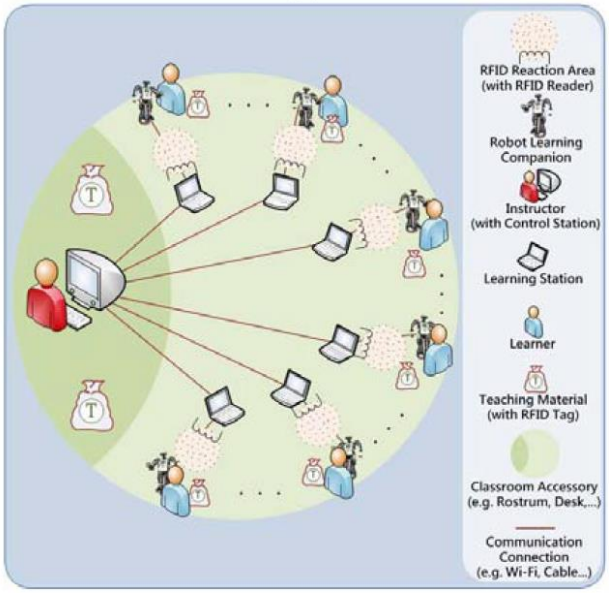


Figure 1 : Représentation schématique du JCLS.

c. Modes d'application du JCLS

Le JCLS peut être utilisé de trois façons (figure 2) :

- Le mode instruction : chaque élève a un robot et peut ainsi participer de façon équitable au cours donné. Dans ce cas, l'enseignant peut communiquer directement avec chaque élève via Wi-Fi et estimer son avancée au cours des activités.

- Le mode apprentissage collaboratif : les élèves sont mis en petits groupes. Le professeur aura une vue d'ensemble du groupe. Les élèves pourront demander l'intervention de l'enseignant, qui joue alors un rôle d'assistant, quand ils le souhaitent.
- Le mode auto-apprentissage : l'élève avance à son rythme et peut également choisir l'ordre de ses activités. Dans ce cas, chaque élève est considéré comme un JCLS. Le robot joue alors le rôle de tuteur qui guide l'élève dans sa réflexion.

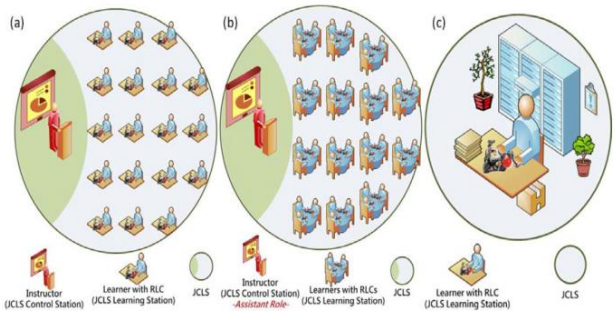


Figure 2 : a) mode instruction ; b) mode apprentissage collaboratif ; c) mode auto-apprentissage. La station de contrôle permet à l'enseignant d'accéder aux données de l'élève via son écran de contrôle. La station d'apprentissage représente l'écran de l'élève.

d. Déroulement de l'expérience

Après avoir effectué l'expérience pilote [9], les chercheurs ont réalisé l'expérience formelle que nous allons développer.

L'expérience formelle répartit 47 élèves taïwanais âgés de 7 à 8 ans en deux groupes : le groupe de contrôle composé de 23 élèves qui vont suivre un cours classique (enseignant au tableau) et le groupe expérimental qui compte 24 élèves qui va utiliser le JCLS (répartis à leur tour en 4 groupes de 6 élèves).

Comme vous pouvez le constater sur la figure 3 qui présente les différentes étapes de la procédure expérimentale, les deux groupes réalisent les mêmes étapes nécessaires à l'apprentissage des multiplications. Le nombre d'étapes diffère uniquement par les étapes liées au JCLS.

Il est important de souligner que lors de l'étape 4 (groupe expérimental), l'élève peut faire plusieurs essais. Dans ce cas et grâce au fait qu'il est connecté à l'ordinateur, le robot compagnon va réagir ; il pourra émettre des sons ou proposer des pistes de réflexion pour aider l'élève à surmonter sa ou ses difficultés.

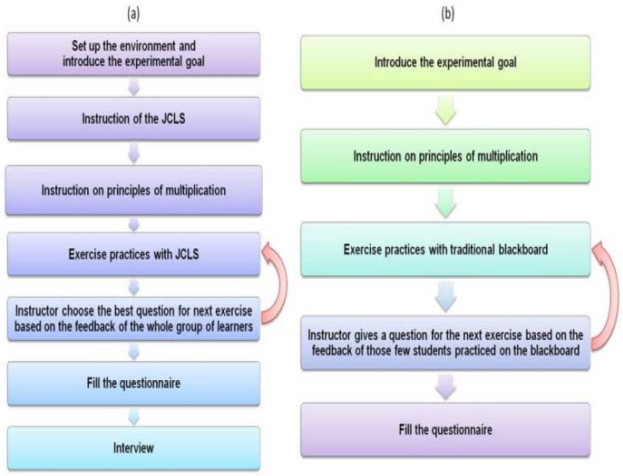


Figure 3 : a) 7 étapes de la procédure expérimentale pour le groupe expérimental. b) 5 étapes de la procédure expérimentale pour le groupe contrôle.

e. Résultats

Avant d'évaluer l'apport du JCLS, Wei et collaborateurs [5] ont réalisé un pré-test. Il a permis de vérifier que le groupe contrôle et le groupe expérimental ont un niveau de connaissances mathématiques sur les multiplications similaire.

Un questionnaire évaluant trois axes a permis de montrer que l'apprentissage avait été bénéfique pour le groupe expérimental par rapport au groupe contrôle, indiquant un effet significatif du JCLS sur ces trois axes :

- L'apprentissage expérientiel : les élèves du groupe expérimental avaient une meilleure représentation du contenu mathématique utilisé dans l'exercice, grâce à ce paradigme de *learning by doing*,
- L'apprentissage constructiviste : les élèves du groupe expérimental avaient l'occasion de construire peu à peu une réponse correcte grâce à la possibilité de faire de nombreux essais et grâce aux feedbacks du robot,
- L'apprentissage joyeux : le côté ludique de l'apprentissage avait une influence positive sur la motivation des élèves.

Les observations faites pendant l'expérience sur le groupe expérimental ont montré que dans une très large proportion, les élèves pratiquaient activement l'exercice (95%), faisaient plusieurs essais pour trouver la réponse correcte (95%), avaient l'air joyeux (e.g., souriaient ; 91%), et l'atmosphère globale dans la classe était joyeuse et agréable pendant l'exercice.

Une interview a été réalisée après l'expérience pour le groupe expérimental seulement. Elle détermine comment les

élèves ont utilisé le JCLS au cours de cette séquence. Les résultats montrent que : les élèves trouvent plus intéressant de travailler avec le JLCS relativement à un cours classique ; leur motivation pour apprendre est plus grande ; les élèves pensent qu'il est utile de pouvoir recommencer plusieurs fois lorsqu'ils font des erreurs afin de pouvoir les identifier.

f. Effets du dispositif sur la motivation

Dans cette étude, le robot utilisé a un design très simple. Il s'agit en effet du petit robot LEGO Mindstorms NXT. Il est important de souligner que ce robot ne peut pas détecter le langage parlé. Il reçoit les inputs des enfants via le dispositif RFID, et leur répond par des mouvements ou des sons. Pour résumer, ce dispositif propose une interaction plutôt rudimentaire. Cependant, malgré ce dispositif très simple, l'expérience a été bénéfique. Le côté ludique du dispositif et le fait de manipuler le matériel mathématique semble avoir permis une expérience bénéfique et positive pour les enfants.

C. Apprendre à écrire en enseignant à un robot : rôles inversés

a. Objectif

Apprendre à former les lettres correctement peut s'avérer parfois difficile pour les enfants. Ecrire des lignes entières pour apprendre à s'appliquer et à former de jolies lettres peut vite ennuyer un enfant. Or, un enfant qui s'ennuie est un enfant qui ne progresse pas et qui, peu à peu, risque de perdre confiance en lui. Cette situation peut donc avoir des conséquences sur sa réussite scolaire.

Hood et collaborateurs [10] ont imaginé un robot capable d'apprendre à écrire des mots. Leur expérience repose sur le paradigme du *learning by teaching* que l'on peut facilement traduire par « l'apprentissage par l'enseignement ». Ces chercheurs partent du principe qu'un enfant apprendra mieux s'il n'est pas dans la position qui lui est habituellement attribuée à savoir celle de l'apprenant. L'apprentissage de l'écriture s'avère tout à fait adaptée au *learning by teaching*. Nous développerons cette idée dans la partie « *Lien enfant-robot* ».

L'idée principale est donc, qu'en corrigeant l'écriture du robot, les jeunes élèves vont pouvoir améliorer leurs compétences graphiques en écriture. Il s'agit ici d'un excellent stratagème ; l'enfant accepte tout à fait l'idée que le robot ne sache pas écrire correctement (ce n'est pas un humain adulte qui sait tout faire) et ne se rend pas compte que le robot fera une forme de lettre acceptable quand lui-même lui proposera une forme de lettre convenable.

b. Fonctionnement du robot

Deanna Hood et son équipe ont utilisé le robot humanoïde Nao V4 développé par Aldebaran Robotics. Ce robot bipède mesurant 58 cm possède 28 degrés de liberté et deux caméras (Figure 4). Il est capable de parler et exécute de nombreuses tâches en autonomie. Pour les besoins de l'expérience, il a été programmé pour : reconnaître des lettres écrites, reproduire les lettres lues en commettant volontairement des erreurs et corriger sa graphie grâce aux démonstrations des enfants devenus professeurs.

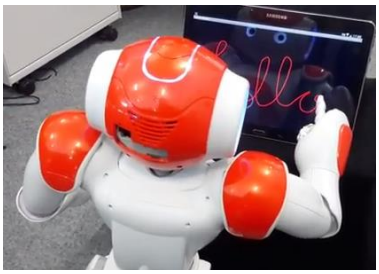


Figure 4 : Nao V4 en train d'écrire sur la tablette.

Nao peut réaliser toutes ces tâches grâce à une base de données qu'il a en mémoire ; il possède 120 exemplaires de chaque lettre. Une analyse en composante principale (ACP) est réalisée pour générer un modèle de forme moyen. Chaque forme de lettre est donc approximée par une moyenne des formes apprises. Cependant, tout le monde n'a pas la même écriture et la même personne pourra avoir des variations graphiques pour la même lettre. Nao doit donc être capable de reconnaître des lettres qui n'ont pas toutes exactement la même forme. Pour cette raison, le système va tenir compte des trois variations principales permettant de générer ainsi des modèles de formes variés (Figure 5) à partir du modèle moyen. Ces modèles sont nécessaires pour deux raisons : permettre à Nao de reconnaître des lettres « mal formées » et écrire volontairement des lettres « mal formées » dans le but d'être corrigé par l'enfant-professeur. Ainsi, le robot pourra s'adapter au niveau d'écriture de l'enfant et proposer plusieurs formes de lettre jusqu'à ce que l'enfant lui propose une forme acceptable (Figure 6).

Le même algorithme permet à Nao de former des lettres dites « pauvres » qui sont des représentations très déformées du modèle de forme (Figure 7).

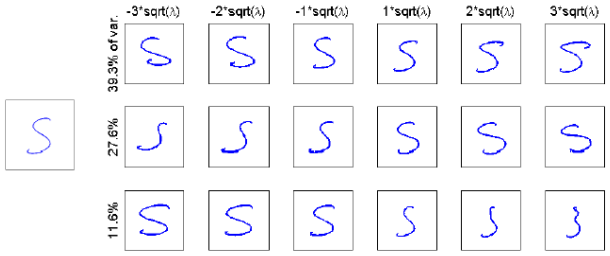


Figure 5 : A gauche, le modèle de forme moyen pour la lettre S. A droite, les modèles de forme générés à partir du modèle de forme moyen. Dans cet exemple, les formes variées de la lettre S sont issues des 3 variations principales (qui représentent les 3 variances les plus importantes).

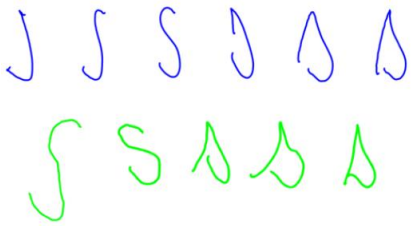


Figure 6 : En haut, lettres générées par l'algorithme en réponse aux corrections de l'enfant. En bas, corrections (démonstrations) de l'enfant. Les lettres les plus à gauche sont les premières et celles les plus à droite correspondent à la dernière itération. On remarque que même si l'enfant change la forme de sa lettre « s », Nao arrive à s'adapter quasiment parfaitement.

Figure 7 : Modèles de lettres « pauvres » générés aléatoirement par l'ACP..

c. Matériel nécessaire

Malgré ces capacités, Nao n'est pas capable de prendre un stylo et d'écrire du texte sur une feuille. Les chercheurs ont donc décidé de faire interagir Nao avec une tablette. Le Roboting Operating System (ROS) permet au robot de localiser la tablette et le serveur NTP (Network Time Protocol) permet la synchronisation entre la tablette et le robot. Pour que le robot prenne les bonnes décisions, il est associé à un contrôleur central (Figure 8) qui lui donne les outputs en fonction des inputs.

Il est donc nécessaire d'avoir : Nao, une tablette et un contrôleur central.

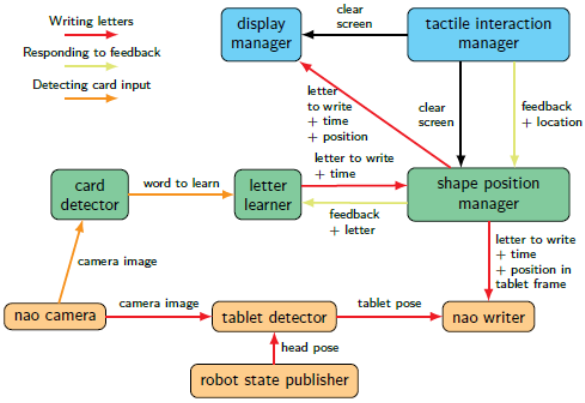


Figure 8 : Vue d'ensemble du système. Les éléments bleus fonctionnent sur la tablette ; les verts, sur le contrôleur central et les oranges, sur le robot.

d. Interaction enfant-robot : déroulement d'une séquence en classe

L'interaction enfant-robot se déroule en 4 étapes :

- Etape 1 : l'enfant montre au robot une carte sur laquelle est écrit un mot de 3 lettres composé exclusivement des lettres (c ; e ; n ; o ; s ; u ; w).
- Etape 2 : le robot lit le mot à voix haute et écrit sur la tablette le mot lu.
- Etape 3 : à la demande du robot, l'enfant corrige la graphie des lettres écrites par le robot. Dans cette étape, l'enfant peut s'y reprendre en plusieurs fois mais ne peut écrire qu'une lettre à la fois. L'enfant appuie sur le bouton de la tablette pour signifier au robot que la correction est terminée.
- Etape 4 : le robot réécrit le mot en tenant compte des corrections apportées par l'enfant.

Les étapes 3 et 4 se répètent jusqu'à ce que l'enfant considère que le mot écrit par le robot est correctement formé.

Pour tester les capacités de Nao, les chercheurs l'ont introduit dans deux classes.

La première classe, correspondant à une étude pilote, sert essentiellement d'essai technico-pratique. Quatre groupes de 8 enfants anglophones, âgés de 6 à 7 ans, ont interagi avec Nao durant 65 minutes. Cette étude pilote a permis d'améliorer l'interaction enfant-robot. En effet, initialement, l'enfant n'avait pas la possibilité de corriger la lettre à n'importe quel endroit (dans l'environnement proche de la lettre écrite par Nao). Les chercheurs ont donc corrigé cet aspect technique qui semblait gêner les enfants. De plus, ils ont observé qu'un trop grand nombre d'enfants dans le même groupe perturbe

l'enfant désigné « professeur du robot ». Ils appellent ce phénomène le *learning by teaching to teach*. Pour éviter cela, ils choisissent, par la suite, de réduire considérablement le nombre d'enfants par groupe.

La seconde classe est constituée de 21 enfants francophones âgés de 7 à 8 ans. La répartition des enfants est la suivante : 7 enfants vont interagir seuls avec le robot et 14 enfants vont interagir par binômes (soit 7 groupes de 2 enfants).

Cette deuxième étude montre que le robot est robuste ; il a interagi avec 21 enfants durant 160 minutes (temps total) sans qu'il n'y ait de problème. Ils constatent aussi que la réduction du nombre d'enfants par groupe a permis d'éviter le phénomène du *learning by teaching to teach*, comme prévu.

e. Lien enfant-robot

Programmer un robot pour qu'il puisse écrire (c'est-à-dire associer une connaissance sémantique à une production manuscrite) est un enjeu de taille. Tan, Du et Wu [11] proposent une méthode qu'ils expérimentent sur le robot humanoïde ISAC. Il s'agit donc d'un autre robot capable d'écrire. Pourtant, l'accent a été mis sur les performances, et son apparence n'est guère adaptée pour instaurer une relation de confiance avec un enfant (figure 9). Dans l'étude que nous avons présentée, les chercheurs ont choisi d'utiliser le robot Nao qui présente l'avantage d'avoir une apparence humanoïde sympathique [12] (figure 9). Dans une enquête récente portant sur la perception et les attitudes à l'égard des robots anthropomorphes en France, Dinet et Vivian [13] ont montré que les robots humanoïdes plaisent aux enfants surtout lorsqu'ils sont de petite taille (le robot parait alors inoffensif). C'est le cas de Nao qui mesure 58 cm. La première approche entre l'enfant et le robot est donc facile, et provoque l'intérêt de l'enfant.

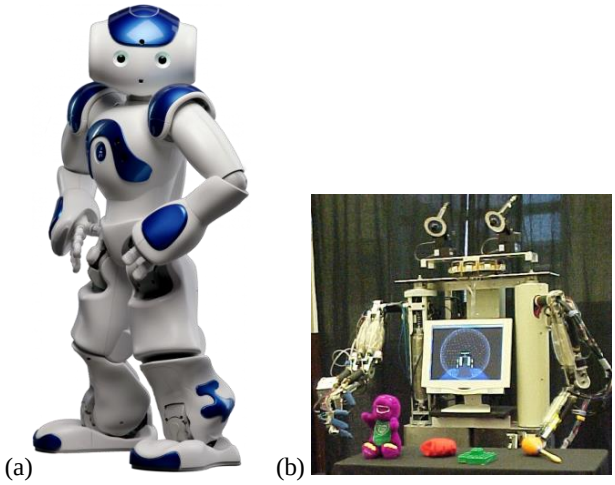


Figure 9 : Les robots Nao (a) et ISAC (b)

Le paradigme *learning by teaching* pour l'apprentissage de l'écriture requiert un pair moins expérimenté à qui l'enfant peut apprendre à écrire. Ceci peut être compliqué à mettre en place, tout particulièrement si l'enfant ciblé est celui qui a les moins bonnes performances en écriture de sa classe. Une solution consisterait pour un adulte de simuler une écriture grossière, mais il est certain que cette solution ne permettrait pas de libérer le potentiel de cette méthode d'apprentissage. C'est pour ces raisons qu'utiliser un robot dans ce paradigme de *learning by teaching* est tout à fait appropriée ; il n'est ni un adulte qui sait écrire et juge les performances de l'enfant, ni un pair / camarade de classe qui peut parfois être vu comme un adversaire.

Les résultats de cette expérience sont un succès, il faut donc nous demander pourquoi cette méthode est particulièrement adaptée à l'apprentissage de l'écriture. Les enfants apprennent tous à écrire au même âge, et pourtant les habiletés motrices peuvent être très différentes chez des enfants d'un même groupe d'âge. Lors de l'apprentissage de l'écriture, des lettres prototypes / standards sont exposées à l'enfant. Celui-ci peut percevoir ces modèles comme des lettres « parfaites » qu'il doit reproduire, ce qui peut être déstabilisant pour un enfant dont la motricité fine est encore en plein développement. Il peut avoir l'impression d'être d'emblée en situation d'échec. Ici, le problème est pris totalement à l'envers. En fait, c'est l'enfant lui-même qui décide de la lettre finale qui doit être atteinte, et c'est le jeu d'allers-retours entre les productions du robot et ses propres productions qui permet d'atteindre cet objectif. Cette situation peut être vue sous l'angle du concept d'estime de soi. L'estime de soi est la valeur, la compétence qu'un individu associe à l'image de soi. Elle peut notamment être fondée sur le choix par l'individu de normes extérieures dont il constate qu'il est ou non capable d'atteindre. Cette situation du *learning by teaching* peut contribuer à améliorer l'estime de soi des enfants puisque c'est lui-même qui fixe la norme extérieure (c'est-à-dire la forme de la lettre à atteindre). Par ailleurs, l'enfant est dans la position de l'expert, qui apprend au robot, ce qui peut lui donner l'impression que le robot a confiance en sa position de porteur de connaissances. Ce rôle privilégié peut également contribuer à augmenter la valeur que l'enfant perçoit de lui-même.

f. Commentaires

Cette approche « pédago-robotique » pour l'apprentissage de la graphie des lettres pourrait aussi bien convenir à un enfant qui n'a pas de difficultés qu'à un enfant présentant des troubles dyslexiques, dysorthographiques ou encore dyspraxiques [14]. Les études tendent à montrer qu'une prise en charge rapide et des exercices adaptés permettent à l'enfant dys- de progresser [14]. Il serait donc intéressant d'expérimenter Nao sur des enfants dys- afin d'évaluer son potentiel dans ce domaine.

III. Les robots pour l'education responsable

Eduquer un enfant, ce n'est pas uniquement lui transmettre des savoirs mais c'est aussi lui apprendre à bien grandir, à devenir un adulte responsable…

Dans cette approche, le robot éducatif n'endosse plus le rôle de professeur (ou compagnon scolaire) mais plutôt le rôle de l'assistant social dans l'éducation pour l'enseignement des bonnes habitudes.

Dans cette partie, nous présentons deux exemples de robots « sociaux » permettant l'éducation des enfants dans deux domaines très différents : la nutrition et le comportement de l'enfant à la maison (rangement des jouets).

A. Bien se nourrir pour bien grandir !

a. Objectif

Selon l'INPES (actualité de février 2012 disponible sur le site internet de l'INPES), 18 % des jeunes français âgés de 3 à 17 ans sont en surpoids ou obèses. Malgré les spots publicitaires et l'éducation à la nutrition, ce nombre a tendance à augmenter, ce qui fait de ce phénomène un véritable problème de santé publique. Les risques liés à l'obésité ou au surpoids ne sont pas négligeables et par conséquent intéressent les chercheurs.

Short et collaborateurs [15] ont proposé une solution qui a pour but d'enseigner à l'enfant comment bien se nourrir pour bien grandir. L'objectif principal de cette expérience est donc de modifier les comportements alimentaires des enfants en interagissant avec un robot ludique nommé *Chili*.

b. Présentation du robot

Le robot utilisé au cours de cette expérience s'appelle *Chili*. Il fait partie de la famille des DragonBot. Comme son nom l'indique, c'est un robot-dragon qui mesure environ 45 cm et qui possède 5 degrés de liberté. Sa « peau » est comparable à celle des peluches. Il a deux bras ainsi qu'une queue et deux ailes.

Ses ailes sont particulières puisqu'elles sont capables de grandir d'une séance à l'autre à condition que les repas proposés par les enfants soient de bonne qualité. En effet, ses ailes peuvent prendre quatre positions pour simuler leur croissance (Figure 10). Cette donnée est essentielle dans la relation créée entre l'enfant et *Chili*. En effet, l'enfant qui a tendance à se lier d'amitié avec le robot, voudra l'aider à bien se préparer pour participer à la grande course des dragons. Pour cela, l'enfant devra proposer des repas équilibrés à *Chili* ce qui lui permettra d'acquérir de bonnes habitudes alimentaires.

c. Matériel et contexte expérimental

L'enfant va devoir composer des repas ; les expérimentateurs ont donc installé des aliments divers sur la table (Figure 10).

Les chercheurs ont choisi d'utiliser le paradigme d'Oz[3]. *Chili* est donc capable d'échanger verbalement avec les enfants grâce au téléopérateur et à des haut-parleurs.

Pour récolter un maximum de données expérimentales, les chercheurs ont ajouté : un capteur Microsoft Kinect, une camera HD, une caméra USB, deux ordinateurs et un ensemble de haut-parleurs (figure 11).

La figure 11 fait apparaître trois personnes : le téléopérateur qui n'est pas dans la salle et qui contrôle le robot ; le participant qui est un enfant et le « fetcher », un second expérimentateur (différent du téléopérateur). Le « fetcher » reste avec l'enfant et lui donne les différentes instructions.

Figure 10 : Sur la table, on peut voir Chili ainsi que les aliments présentés.

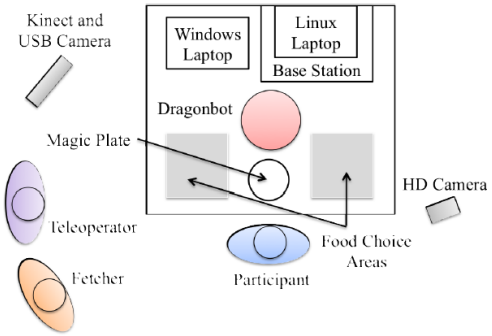


Figure 11 : Schéma du dispositif expérimental.

[3] *Le paradigme de Oz aussi appelé paradigme du Magicien d'Oz, est un paradigme dans lequel les sujets interagissent avec un système informatisé qu'ils croient autonome, mais qui est en réalité contrôlé totalement ou partiellement par un être humain (téléopérateur) non vu par les sujets.*

d. Expérience

Elle comporte 6 sessions réparties sur 3 semaines. 26 enfants américains âgés de 5 à 8 ans ont réalisé deux sessions par semaine. Chaque semaine est structurée de la même façon :

- Lors de la première session (appelée session expert SE), *Chili* est un expert en nutrition ; il donne des informations sur les différents aliments. L'enfant choisit un aliment, le présente à *Chili* qui goûte ce dernier puis donne les informations nécessaires (présence de sucres, de graisses, de vitamines…) L'enfant est donc en situation d'apprentissage.
- Lors de la deuxième session (appelée session coopérative SC), *Chili* et l'enfant coopèrent pour réaliser un repas équilibré. Au cours de cette session, *Chili* fait un bref rappel de la session précédente. L'enfant choisit les aliments qui vont composer l'assiette magique (figure 11) et *Chili* va orienter les choix de l'enfant jusqu'à ce qu'une assiette satisfaisante lui soit proposée.

L'objectif évolue au cours des 3 semaines. La première semaine, le but est de préparer une lunch box ; la deuxième semaine, l'enfant devra proposer un goûter ; la troisième et dernière semaine, l'enfant devra réaliser un repas complet.

e. Données expérimentales

Les expérimentateurs récupèrent les données expérimentales électroniques (telles que les données audio et vidéo, les données du téléopérateur issues de la Kinect…) et les complètent grâce à des questionnaires fréquemment utilisés en robotique[4].

f. Résultats et analyse de l'interaction

Dans un premier temps, les chercheurs ont évalué la manière dont le robot a été perçu par les enfants. Les résultats aux questionnaires complétés par les enfants ont montré qu'ils avaient une perception largement positive du robot. Ils le percevaient comme utile, agréable, attrayant, et ayant une forte présence sociale. De manière générale, ce robot a donc été très bien reçu par les enfants. Ces résultats montrent une fois de plus l'attrait des enfants pour les robots, à compter qu'ils aient une apparence sympathique.

Dans un second temps, les auteurs ont évalué l'évolution de la relation entre les enfants et le robot de deux manières. L'interaction en elle-même a été explorée grâce au calcul du temps de réponse moyen des enfants aux questions posées par le robot. Ce temps de réponse moyen a diminué de manière significative (de 4,3 secondes à 3,5 secondes) entre le premier et le dernier jour d'expérimentation. Ce résultat indique que l'interaction s'est fluidifiée au cours des trois séances, et ainsi que les enfants sont de plus en plus engagés dans cette interaction au cours du temps.

Pour évaluer la qualité de l'interaction, les auteurs ont d'abord utilisé une mesure largement répandue en psycholinguistique et psychologie du développement : la longueur moyenne d'énoncé (ou *mean length of utterance – MLU*). Cette mesure consiste à diviser le nombre de mots (ou de morphèmes, selon les méthodes) par le nombre d'énoncés (c'est-à-dire dès lors que l'enfant fait une production langagière), et consiste en un indicateur fiable de la complexité morphosyntaxique. Si le MLU a augmenté au fur et à mesure des séances, la différence entre le premier et le dernier jour n'était pas significative. La qualité de l'interaction a ensuite été explorée grâce à une analyse linguistique. Les énoncés étaient classés en trois types : (a) simples (e.g., « oui », « non », « mmh… », « ok »), (b) développés (e.g., « c'est équilibré », « j'aime bien ça »), et (c) relationnels (e.g., « tu as dit que tu n'aimais pas ça »). Les types d'énoncés produits étaient surtout très différents selon les enfants, mais ont globalement évolué au cours de l'expérience. Pendant la première séance, la grande majorité des énoncés étaient simples, alors que pendant la dernière, la proportion d'énoncés développés avait augmenté, et quelques énoncés relationnels commençaient à faire leur apparition (figure 12).

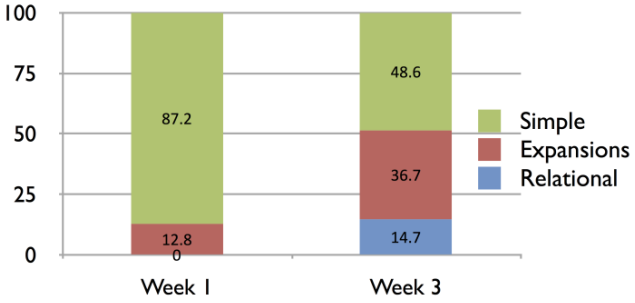


Figure 12 : Proportion de chaque catégorie d'énoncés à la première et à la dernière séance

Globalement, ces résultats montrent un changement positif dans les comportements des enfants à l'égard du robot au cours du temps. Au début de l'interaction, l'échange semble plutôt machinal, avec des réponses très simples données à un intervalle assez important (environ 4 secondes). Au fur et à mesure de l'exercice, l'interaction devient plus fluide, puisque les réponses sont plus complexes et arrivent avec un délai moindre.

Ainsi, le design du robot *Chili* (un Dragonbot) et la nature de l'exercice (aider *Chili* à bien se préparer pour la grande course des dragons) semblent avoir convaincu les enfants. Le

[4] *L'article original [15] détaille ces questionnaires : le Perceived Value Questionnaire, le Social Presence Questionnaire et la Adapted Companion Animal Bonding Scale.*

sujet de la nutrition et du « manger équilibré » qui peut sembler rébarbatif à l'enfant lorsqu'il est asséné quotidiennement par des adultes, prend ici un aspect ludique. Par ailleurs, l'ébauche de relation pseudo-sociale entre l'enfant et le robot qui a été observée pendant cette expérience a permis de maintenir l'intérêt de l'enfant pendant trois séances consécutives.

Pour évaluer les répercussions de cette interaction enfant-robot sur la capacité des enfants à faire de meilleurs jugements sur la nutrition, les auteurs ont calculé pour chaque enfant un ratio correspondant au nombre de fois où l'enfant sélectionne un aliment non-sain sur le nombre de fois où il sélectionne un aliment sain. Ce ratio diminue au cours du temps, mais la différence entre la première et la dernière session n'est pourtant pas statistiquement significative.

g. Commentaires

Cette expérience mériterait d'être répliquée avec un plus grand nombre de séances. En effet, pendant ces trois séances l'interaction entre l'enfant et le robot a été de plus en plus riche, sans pour autant permettre une amélioration significative des connaissances (ou en tout cas des comportements) des enfants vis-à-vis de la nutrition. Un plus grand nombre de rencontres permettrait de vérifier d'une part que l'interaction s'enrichit toujours plus sur le long terme, et d'autre part que celle-ci a une réelle répercussion sur les connaissances et les comportements des enfants vis-à-vis de la nutrition.

B. Apprendre à ranger sa chambre

a. Objectif

Tous les parents demandent à leurs enfants de ranger leur chambre après avoir fini de jouer mais combien le font réellement ? Cette « bonne habitude » n'est pas innée et doit faire l'objet d'un apprentissage.

C'est dans cette optique que l'équipe de Fink, Rétornaz et Wille [16] ont créé un robot jouet susceptible d'inciter les enfants à ranger leur chambre.

Cette expérience a pour objectif d'évaluer l'efficacité d'un robot domestique dans l'apprentissage d'un geste quotidien auprès des enfants. Pour ce faire, ils utilisent un robot-objet ou RObject.

b. Présentation du robot et besoins matériels

Le robot utilisé dans cette expérience est un robot-caisse à jouets, il est appelé *Ranger* d'après le verbe français. Il doit influencer l'enfant pour qu'il range sa chambre sans pour autant l'y contraindre. De plus, il ne doit pas uniquement plaire aux enfants ; il fera partie intégrante de la maison et devra donc être accepté par toute la famille y compris les parents. Les chercheurs ont donc choisi de donner à *Ranger* un look sympathique, très simple et ludique (figure 13). Les chercheurs supposent que son aspect « caisse à jouets » encouragera les enfants à ranger leurs jouets.

Ce robot ne possède ni bras ni mains pour appréhender les objets ; son rôle est donc uniquement d'inciter l'enfant à ranger ses jouets sans le faire à sa place. Pour cela, il est équipé de deux roues qui lui permettent de se déplacer, d'une paire d'yeux et de sourcils qu'il est capable de bouger, de haut-parleurs pour émettre des sons, et de lumières. Grâce à cet équipement, *Ranger* peut exprimer des émotions simples (faciales, accompagnées ou non de sons et/ou de lumières).

Le robot peut avoir deux comportements :

- Proactif : il se déplace vers le jouet ;
- Réactif : il répond aux actions de l'enfant mais reste plus ou moins à la même place dans la pièce (ne cherche pas les jouets)

Voici les différentes actions possibles réalisées par *Ranger* :

Réactions / Actions	Son	Lumière	Mouvements de *Ranger*
Objet placé dans la caisse	Son récompense	Rouge	Eventuellement petits mouvements
Plusieurs objets placés dans la caisse	Son récompense	Arc-en-ciel	Tourne en rond
Objet éloigné de la caisse	Son imitant le vide	Verte	x
L'enfant touche la caisse ou lui fait un câlin	x	*Ranger* rougit ; du rose apparaît au niveau des joues	x
La caisse est malmenée	Bruit indiquant que Ranger est dérangé	x	Mouvement de recule
Uniquement en comportement proactif : Ranger trouve un objet par terre	x	Lumière pulsée jaune	Les yeux montrent l'objet puis *Ranger* bouge d'avant en arrière

Comme pour le robot *Chili*, les chercheurs ont choisi la méthode expérimentale d'Oz. Ce dernier nécessite d'avoir un

expérimentateur (téléopérateur) qui peut voir ce qui se passe dans la chambre sans être vu afin de contrôler le robot en fonction du comportement de l'enfant. Une caméra est donc placée dans la pièce. Par l'intermédiaire d'un ordinateur connecté par Bluetooth au microcontrôleur du robot, le téléopérateur peut adapter les réactions et les mouvements de *Ranger*. Toutes les commandes sont pré-codées pour faciliter la tâche du téléopérateur ; il n'a plus qu'à appuyer sur les boutons pour que *Ranger* réalise une ou plusieurs actions (se déplacer, faire du bruit…).

Figure 13 : Le robot Ranger. La première version mesurait 27 × 37 × 37 cm.

c. Expérience

Elle s'est déroulée auprès de 14 familles pour un total de 31 enfants (16 garçons et 15 filles) âgées de 2 à 10 ans. La moitié des familles a testé *Ranger* en mode proactif ; l'autre moitié l'a testé en mode réactif.

L'étude se compose de quatre étapes :

- Etape 1 (5 min) : présentation du dispositif et des objectifs (uniquement pour les parents) ;
- Etape 2 (15 min) : pré-interview de la famille sur les habitudes de rangement et préparation du matériel ;
- Etape 3 (30 min) : interaction avec *Ranger*. Aucune instruction n'est donnée à l'enfant sur l'utilisation du robot ;
- Etape 4 (5 min) : post-interview de la famille pour évaluer le design du robot, son utilisation, son utilité, les améliorations envisageables, sa présence sociale…

d. Résultats

Les données vidéo enregistrées dans la chambre de l'enfant pendant la phase d'interaction étaient analysées par deux juges qui codaient les différents comportements que l'enfant avait à l'égard du robot. Ces analyses montrent que globalement quasiment la moitié du temps total de l'interaction (47 %) était consacrée à l'exploration de *Ranger* par les enfants. On note de manière intéressante que ce temps d'exploration était presque deux fois plus long lorsque le robot était proactif que lorsqu'il était réactif. Toutefois, cette différence n'était pas statistiquement significative. Les enfants avaient tendance à vouloir jouer avec le robot lorsqu'il était proactif, mais pas lorsqu'il était réactif, par exemple en lui faisant chercher un jouet placé sur le sol.

La différence dans le comportement du robot a également entraîné une différence dans son efficacité pour ranger la chambre. Contrairement à l'hypothèse initiale des chercheurs, le robot réactif était plus efficace pour motiver les enfants à ranger leur chambre que le robot proactif (le nombre de jouets rangés était plus important lorsque le robot était réactif). Ce résultat peut s'expliquer par le fait que l'interaction avec le robot proactif étant plus riche et plus amusante, les enfants étaient peut-être moins intéressés par le fait de ranger la chambre que de découvrir le robot et jouer avec lui.

Les auteurs ont également évalué l'acceptation du robot par les parents. Celui-ci était globalement jugé de manière positive. Les parents s'accordaient à dire que *Ranger* était utile, facile à utiliser et amusant.

Le design du robot a plu aussi bien aux enfants qu'aux parents. Ils reportèrent que ce qu'ils préféraient chez le robot était les sons et les lumières qu'il produisait, ses yeux qui pouvaient bouger, ainsi que son aspect simple d'une boîte en bois, ce qui conforte les auteurs dans leur approche RObjects.

e. Analyse de l'interaction

Les enfants semblaient particulièrement intéressés par les yeux de *Ranger*. Par exemple, certains enfants lui montraient les jouets avant de les ranger. D'autres enfants semblaient intrigués par le fait de savoir si *Ranger* pouvait voir ou non, remuant leur main devant ses yeux. Ces observations sont importantes lorsque l'on sait que le regard est un élément essentiel de l'interaction entre êtres humains, en permettant par exemple d'analyser où est orientée l'attention de nos congénères [17]. Alors que l'objectif de cette expérience était de faire émerger un comportement de coopération entre l'enfant et le robot, on voit ici l'importance de cet indice social.

Par ailleurs, d'autres éléments laissent penser que les enfants ont eu tendance à attribuer un rôle social au robot pendant l'expérience. En effet, les enfants semblent avoir attribué des états émotionnels à *Ranger* : le robot aurait été « content » lorsqu'il recevait un jouet, et « pas content » lorsqu'il était vide.

Nous voyons ici que ce petit RObject à l'apparence se rapprochant d'une caisse à jouets tout à fait ordinaire peut amener à faire émerger une interaction pseudo-sociale avec des enfants. Il semblerait que ceci soit permis par le fait que le robot ait des « réactions émotionnelles » simulées par un jeu de sons et lumières, et surtout par la présence d'une paire d'yeux mouvants.

IV. Conclusion

Pour conclure, nous avons exposé dans cette revue quelques axes de recherche en robotique destinée à l'enfant. Nous avons notamment pu voir qu'il existe un grand engouement à développer des robots qui pourraient fournir une aide ou simplement un support aux enfants, pour l'apprentissage de différentes compétences, connaissances ou comportements. A travers les quatre exemples précédemment exposés, nous constatons que ces recherches sont prometteuses. L'enjeu est de poursuivre ce développement en permettant l'évolution et le maintien du lien enfant-robot, qui pourrait ainsi assurer une aide aux apprentissages sur le long terme. Le déploiement de ces technologies est pourtant à considérer plus largement sous l'angle de l'éthique et des cultures, qui ne sont pas toutes également disposées à accueillir des robots compagnons dans la vie quotidienne.

Remerciements

Nous voudrions remercier nos professeurs Sylvie Pesty et Gérard Bailly pour nous avoir orientées dans notre travail de revue.

Merci aussi au moteur de recherche Google Scholar pour mettre à notre disposition de nombreux articles.

References

[1] Sharkey, Noel, and Amanda Sharkey. "The Crying Shame of Robot Nannies: An Ethical Appraisal." *Interaction Studies* 11, no. 2 (June 1, 2010): 161–90. doi:10.1075/is.11.2.01sha.

[2] Van den Broek, Egon L. "Robot Nannies: Future or Fiction?" *Interaction Studies* 11, no. 2 (2010): 274–82. doi:10.1075/is.11.2.16van.

[3] Fine, Aubrey H. *Handbook on Animal-Assisted Therapy: Theoretical Foundations and Guidelines for Practice*. Academic Press, 2010.

[4] Belpaeme, Tony, Paul E. Baxter, Robin Read, Rachel Wood, Heriberto Cuayáhuitl, Bernd Kiefer, Stefania Racioppa, et al. "Multimodal Child-Robot Interaction: Building Social Bonds." *Journal of Human-Robot Interaction* 1, no. 2 (December 21, 2012): 33–53.

[5] Wei, Chun-Wang, I Hung, Ling Lee, and Nian-Shing Chen. "A Joyful Classroom Learning System with Robot Learning Companion for Children to Learn Mathematics Multiplication." *Turkish Online Journal of Educational Technology-TOJET* 10, no. 2 (2011): 11–23.

[6] You, Zhen-Jia, Chi-Yuh Shen, Chih-Wei Chang, Baw-Jhiune Liu, and Gwo-Dong Chen. "A Robot as a Teaching Assistant in an English Class," 87–91. IEEE, 2006.

[7] Chang, Chih-Wei, Jih-Hsien Lee, Po-Yao Chao, Chin-Yeh Wang, and Gwo-Dong Chen. "Exploring the Possibility of Using Humanoid Robots as Instructional Tools for Teaching a Second Language in Primary School." *Journal of Educational Technology & Society* 13, no. 2 (2010): 13–24.

[8] Barker, Bradley S, and John Ansorge. "Robotics as Means to Increase Achievement Scores in an Informal Learning Environment." *Journal of Research on Technology in Education* 39, no. 3 (2007): 229–43.

[9] Chen, Nian-Shing, I Hung, and Chun-Wang Wei. "Developing Ubiquitous Learning System with Robots for Children's Learning," 61–68. IEEE, 2010.

[10] Hood, Deanna, Séverin Lemaignan, and Pierre Dillenbourg. "When Children Teach a Robot to Write: An Autonomous Teachable Humanoid Which Uses Simulated Handwriting," 83–90. ACM, 2015.

[11] Tan, Huan, Qian Du, and Na Wu. "Robots Learn Writing." *Journal of Robotics* 2012 (2012).

[12] Gouaillier, David, Vincent Hugel, Pierre Blazevic, Chris Kilner, Jerome Monceaux, Pascal Lafourcade, Brice Marnier, Julien Serre, and Bruno Maisonnier. "The NAO Humanoid: A Combination of Performance and Affordability." *arXiv:0807.3223 [cs]*, July 21, 2008.

http://arxiv.org/abs/0807.3223.

[13] Dinet, J., and R. Vivian. "Perception et Attitudes à L'égard Des Robots Anthropomorphes En France : Validation D'une échelle D'attitudes." *Psychologie Française*, Ergonomic Psychology, 60, no. 2 (June 2015): 173–89. doi:10.1016/j.psfr.2015.05.002.

[14] Martinet, Catherine, and Sylviane Valdois. "L'apprentissage de L'orthographe D'usage et Ses Troubles Dans La Dyslexie Développementale de Surface." *L'Année Psychologique* 99, no. 4 (1999): 577–622.

[15] Short, Elaine, Katelyn Swift-Spong, Jillian Greczek, Aditi Ramachandran, Alexandru Litoiu, Elena Corina Grigore, David Feil-Seifer, Samuel Shuster, Jin Joo Lee, and Shaobo Huang. "How to Train Your Dragonbot: Socially Assistive Robots for Teaching Children about Nutrition through Play," 924–29. IEEE, 2014.

[16] Fink, Julia, Séverin Lemaignan, Pierre Dillenbourg, Philippe Rétornaz, Florian Vaussard, Alain Berthoud, Francesco Mondada, Florian Wille, and Karmen Franinović. "Which Robot Behavior Can Motivate Children to Tidy up Their Toys?: Design and Evaluation of Ranger," 439–46. ACM, 2014.

[17] Langton, Stephen R. H., Roger J. Watt, and Vicki Bruce. "Do the Eyes Have It? Cues to the Direction of Social Attention." *Trends in Cognitive Sciences* 4, no. 2 (February 1, 2000): 50–59. doi:10.1016/S1364-6613(99)01436-9.

Entre Agent Robotique et Agent Virtuel, Lequel Choisir ?

Melissa Pothier, *Etudiante, Phelma,* Solène Lyon, *Etudiante, Phelma*

***Résumé*—La richesse d'études sur l'agent robotique et l'agent virtuel permet aujourd'hui d'étudier les interactions possibles avec l'homme. La littérature permet de mettre en évidence leurs caractéristiques et leurs effets dans un certain nombre de conditions expérimentales. La présente synthèse a pour ambition une revue de la littérature pour comparer les différents types d'agent et ainsi mettre en évidence les points forts et les points faibles des agents robotiques ou des agents virtuels. Malgré une quantité d'arguments en faveur du robot et une préférence générale, certaines interactions restent préférables auprès de l'agent virtuel. Ainsi, en fonction de la tâche, il est mieux d'utiliser un agent virtuel ou un robot. En outre, une alternative reste possible : l'agent mixte. Celui-ci peut combiner les avantages des agents robotique et des agents virtuel pour être mieux adapté à certaines tâches.**

***Mots Clés*—Robot, Agent virtuel, Agent mixte, Robotique sociale**

I. Introduction

L'essor de la robotique sociale implique d'importants enjeux. De ce fait, la recherche s'intéresse de près aux applications ainsi qu'aux modifications sociétales que celle-ci peut générer. En outre, la diversité d'études sur le sujet permet la dissociation en deux catégories d'agents : les agents robotiques ou plus couramment "robot" et les agents virtuels ou avatars animés. Nous ferons état de cette dissociation dans le domaine de l'interaction auprès de l'être humain. Cependant, même si la présente étude se concentrera principalement sur les robots et les agents, ce ne sont pas les seuls types de systèmes artificiels existant. Selon Milgram & al [1], l'ensemble des systèmes artificiels peuvent se positionner sur un seul axe qui fait office de continuum (Figure 1). Ainsi, le robot se trouve à une des extrémités de l'axe dans l'environnement réel alors que l'agent virtuel se trouve à l'autre extrémité de l'axe dans l'environnement virtuel.
Par ailleurs, selon Fong & al [2] un robot social interactif doit avoir un certain nombre de caractéristiques humaines. Il doit pouvoir "exprimer et percevoir des expressions, communiquer avec un dialogue de haut niveau, savoir établir et maintenir des relations sociales, utiliser des signaux naturels (regard, gestuelle...), avoir un caractère et une personnalité distinctive, être capable d'apprendre et de développer de nouvelle compétences sociales". Dalibard & al [3] postulent que ces critères doivent également être utilisés pour les agents sociaux interactifs.

A. Agent robotique et Agent virtuel

Le robot, présent dans l'espace physique, peut interagir directement avec ce qui l'entoure, manipuler des objets,

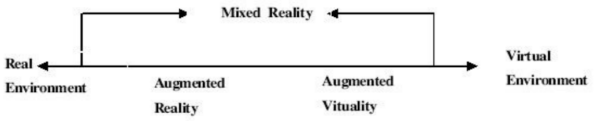


FIGURE 1: Continuum entre réalité et virtualité établi par Milgram & al [1].

se déplacer librement, toucher les personnes avec qui il communique. Par ailleurs, du fait de sa présence dans le monde réel il obéit aux lois de la physique qui nous sont familières, le robot est défini comme étant particulièrement réaliste [4]. Ces caractéristiques semblent être un avantage et entraînent un impact social plus important qu'avec les agents virtuels. Cependant, les capacités d'expressions faciales du robot restent faibles contrairement aux capacités quasi illimitées des agents virtuels. Les agents virtuels peuvent donc utiliser les expressions faciales pour véhiculer des émotions plus facilement que le robot. En outre, ils sont capables de faire des activités que les robots ne peuvent pas comme courir ou nager. En raison de ces caractéristiques, l'agent virtuel est défini comme étant plus anthropo-zoomorphique (lifelike) que le robot [5].Cependant, suite à leurs expérimentations, les résultats de Powers & al [4] montrent que les robots sont décrits comme plus anthropomorphiques que les agents ce qui contredit Holz & al [5] et leur intuition préalable(Figure 2).
En outre, lorsque le robot s'épanouit dans le même espace que nous, l'agent est confiné à un écran mais peut tout de même naviguer entre différentes plateformes [5]. L'utilisateur doit initier l'action pour interagir avec lui et celui-ci ne peut pas pointer du regard un objet qui sort de l'espace virtuel.
Ces différences entre agent robotique et agent virtuel entraînent certaines distinctions au sein de la relation robot/humain et agent/humain.

B. Design

Outre le choix du modérateur (agent robotique vs agent virtuel), on peut se poser la question de l'importance de son design. Plusieurs auteurs pensent que le modérateur doit être le plus anthropomorphique possible car les humains sont habitués à interagir entre eux. Les humains s'attendent à interagir avec une voix humaine [6], un visage humain [7] et un mouvement humain [8].
Cependant Zanbaka & al [9] montrent que les utilisateurs interagissant avec les agents zoomorphiques ont des performances similaire à ceux interagissant avec des agents anthro-

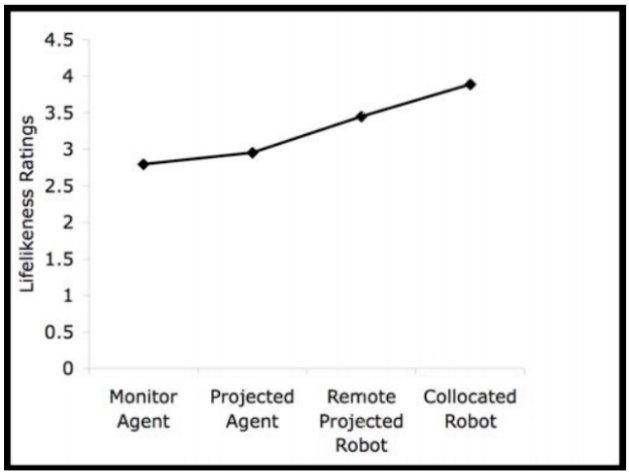


FIGURE 2: Évaluation du degré d'anthropomorphisme en fonction du modérateur (agent vs robot). Power & al [4].

pomorphique dans des tâches sociales. Ces résultats semblent montrer que l'anthropomorphisme n'est pas aussi nécessaire que l'indique les études précédentes.

C. Paradigme expérimental

Malgré que peu d'études fassent une comparaison entre les aptitudes et les caractéristiques associées aux robots ou aux agents, les études de Nass & al [10] permettent d'établir certaines hypothèses. Ils ont simultanément étudié les interactions humain/humain et humain/machine. Leurs travaux indiquent qu'il est possible de remplacer un humain par une machine en tant qu'acteur social dans les interactions. Ainsi, les résultats mis en évidence en psychologie sociale peuvent servir de socle et aider à formuler des hypothèses dans le cadre des relations sociales entre humain et machine. Cependant, les travaux de Shechtman et Horowitz [10] modulent les résultats de Nass & al [10]. Selon eux, toutes les interactions humain/machine ne sont pas les mêmes que les interactions humain/humain. En utilisant une autre méthodologie que celle utilisée par Nass & al [10], ils déterminent que des humain ayant une conversation ensemble font plus d'effort, utilisent plus de mots et que l'échange dure plus longtemps qu'avec un système artificiel.
Les travaux de Shechtman et Horowitz [10] rappellent l'importance de tester les résultats issus de la psychologie sociale malgré leur possible généralisation.

Par ailleurs, afin de permettre une meilleure compréhension des résultats mis en évidence dans les différents articles, nous avons choisi de développer les protocoles expérimentaux classiquement utilisés. Yamato & al [11] séparent les participants en deux conditions expérimentales. Dans la première, la tâche est couplée à l'interaction avec un robot alors que dans la seconde la tâche est couplée à l'interaction avec un agent virtuel. Wainer & al [12] [13] complexifient le protocole expérimental en divisant la condition robot en deux. Dans la première condition robot, celui ci est co-localisé, c'est à dire que le

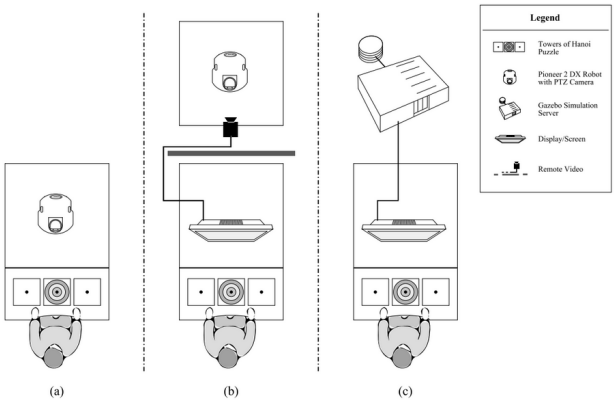


FIGURE 3: Protocole expérimental de Wainer et al [12] : A. Condition robot co-localisé, B. Condition robot éloigné, C. Condition agent virtuel.

robot est présent directement dans le même environnement que l'utilisateur. Dans la seconde condition robot, il est éloigné. Le robot est dans une autre pièce et la communication se fait via une téléconférence en temps réel. Powers & al [4] complexifient encore le protocole expérimental en séparant la condition agent en deux. Dans la première, l'agent interagit de manière classique via l'ordinateur. Dans la seconde, l'agent est projeté en grande taille sur un mur pour imiter une téléconférence.
La quasi totalité des études sur la comparaison entre robot et agent se positionne sur l'un de ces protocoles expérimentaux.

II. LES AVANTAGES DU ROBOT

L'ensemble de la littérature sur le sujet tend à montrer que les robots ont un certain nombre d'avantages concernant l'interaction sociale avec un humain par rapport à l'agent virtuel. Ces arguments vont être développés dans les paragraphes suivants.

A. Présence physique

Wainer & al [12] considèrent que les robots sont uniquement des agents avec un corps physique qui partagent notre environnement. De ce fait, les résultats qui sont propres aux robots devraient uniquement être induits par leur corps physique. Les auteurs supposent que l'impact du corps physique et du corps graphique ne sont pas équivalents lors de l'interaction. Ils choisissent de mesurer l'impact de la proximité physique via le temps d'interaction entre les modérateurs (robot vs agent) dans les différentes conditions. Les auteurs supposent que dans le cadre d'une interaction illimité (sans limite de temps) :

- Le robot co-localisé va susciter plus d'interaction que le robot éloigné.
- Le robot co-localisé va susciter plus d'interaction que l'agent.
- Le robot éloigné va susciter plus d'interaction que l'agent.

Cependant, les auteurs ne trouvent aucune différence significative entre les différentes conditions. Les utilisateurs

ont attribué le même temps aux modérateurs indépendamment des conditions expérimentales. Cependant, les auteurs déclarent qu'ils ne peuvent pas conclure sur les hypothèses en évoquant l'invalidité du critère utilisé pour évaluer l'impact de la présence physique. Malgré ces résultats, Wainer & al [13] continuent d'émettre des hypothèses à propos des caractéristiques associées à la présence physique. Les auteurs supposent que la proximité physique et le réalisme influencent la vigilance de l'utilisateur et sa perception de la capacité à aider du modérateur. Suite à leur expérimentation, les résultats de Wainer & al [13] vont dans le sens de l'hypothèse émise précédemment.

Powers & al [4] supposent également que la proximité physique a un impact important sur les relations sociales. Ainsi, le robot directement perçu dans l'environnement des utilisateurs aura un impact social plus important que l'agent virtuel perçu via ordinateur. En outre, la réponse physique cause une facilitation sociale telle que définie par Zajonc & al [14] et peut augmenter la conformité sociale. Zajonc & al indiquent que la simple présence physique d'autrui influence la performance des participants. Les auteurs montrent une amélioration des performances de la tâche lorsqu'elle est déjà maîtrisée par les participants (tâche simple) et une diminution des performances lorsque les participants ne la maîtrisent pas parfaitement (tâche complexe).

Powers & al [4] supposent également qu'un robot éloigné aura un impact social plus faible qu'un robot co-localisé. En somme, le robot co-localisé aurait plus d'impact social que le robot éloigné, que les agents. L'impact social à été mesuré à travers le comportement et les attitudes des participants. Cependant, les auteurs ne relèvent pas de différence significative entre les différentes conditions expérimentales. Ces résultats ne sont pas consistants avec les résultats de Bradner & al [15] qui montrent un effet de facilitation sociale plus important avec le robot.

En outre, Lee & al [16] montrent que la présence physique augmente le sentiment de présence sociale et l'évaluation générale du robot par rapport à l'agent.

B. Sentiment de présence

Lee & al [16] définissent la présence sociale comme la simulation mentale d'une autre intelligence, l'utilisateur répondant à cette simulation comme à un autre être humain. Cette définition peut apporter une compréhension plus fine du sentiment de présence. Plusieurs études ont été menées dans le but de définir l'impact du sentiment de présence au sein de l'interaction humain/robot ou humain/agent [4], [5], [12], [16], [17]

Powers & al [4] suggèrent que la présence physique est moins importante que le sentiment de présence. Ils proposent de tester la validité de cette hypothèse en fonction de l'impact social du robot sur l'utilisateur. Si le sentiment de présence est plus important que la présence physique les deux conditions avec le robot (co-localisé vs éloigné) devrait avoir le même impact social. Ils prédisent également que les agents, moins réalistes engendreront un sentiment de présence plus faible que les robots. Cependant, les résultats montrent une différence significative entre le robot co-localisé et le robot éloigné. Le sentiment de présence se révèle plus important dans la première condition que dans la seconde. Ce résultat indique que la présence physique à plus d'importance que ce qui est suggéré par les auteurs. En revanche, Powers & al [4] observent bien un sentiment de présence plus important dans les deux conditions robot que dans les conditions agent. Cependant, contrairement à ce que pensent les auteurs, Nowak et Biocca [18] montrent que le réalisme de l'agent n'a pas d'impact sur le sentiment de présence. Ainsi, d'après les résultats de Nowak et Biocca, ceux obtenus par Powers & al [4] peuvent éventuellement être expliqués par un autre critère que le réalisme.

Toutefois, les résultats de Powers & al sont confirmés par Holz & al. (2009) qui indiquent que les robots sont souvent préférés aux agents dans une interaction individuelle car ils engendrent un sentiment de présence plus important.

Lee & al [16] trouvent également un plus fort sentiment de présence sociale lorsque le participant interagit avec le robot plutôt qu'avec l'agent. Les auteurs montrent que les réponses sociales du participant (évaluation de l'interaction, attraction, évaluation de l'agent ou du robot...) sont influencées par le sentiment de présence généré lors de l'interaction. Cependant, Lee & al [16] montrent une inversion du sentiment de présence entre les conditions lorsque les participants ne peuvent pas toucher le robot, seulement le regarder. Les participants indiquent qu'ils s'attendaient à plus d'interaction physique avec le robot. Par ce fait, les auteurs suggèrent que l'absence de possibilités tactiles lors de l'échange avec le robot entraîne une diminution du sentiment de présence sociale.

En outre, Wainer & al [12] montrent que la perception de la conscience social est plus forte chez le robot co-localisé que chez le robot éloigné ou l'agent virtuel. Cependant, les auteurs ne révèlent pas si la perception de la conscience sociale s'est avérée différente entre le robot éloigné et l'agent virtuel.

Par ailleurs, contrairement aux résultats précédent, Zlotowski [17] ne trouve pas de différences entre l'évaluation du sentiment de présence par les utilisateurs entre la condition robot et la condition agent. Toutefois, les participants étant indécis sur la signification du "sentiment de présence", ces résultat peuvent être modulés. En effet, Zlotowski évoque la nécessité de définir l'idée au sein du questionnaire au lieu de poser la question directement.

Ces différentes études montrent l'impact de la variation des conditions expérimentales sur le sentiment de présence. Classiquement, celui-ci est plus important lorsque le robot est co-localisé, légèrement moins lorsqu'il est éloigné et encore moins lorsqu'il est généré par un agent virtuel. Néanmoins, aucune explication n'a été validée pour permettre de comprendre cette différence.

C. Engagement, Sentiment de familiarité

De manière générale, les utilisateurs sont plus attirés par un robot que par un agent virtuel, ils ont un sentiment

de familiarité plus fort, créant un jugement plus positif et un engagement plus élevé pour le robot. Le sentiment de familiarité peut être mesuré directement grâce à un questionnaire que l'utilisateur doit remplir à la fin de la tâche. C'est ce qui est généralement fait, comme pour Yamato & al [11], qui ont trouvé que le sentiment de familiarité était beaucoup plus fort pour le robot que pour l'agent virtuel.
Par ailleurs, plus l'utilisateur se sent à l'aise avec l'agent, qu'il soit robotique ou virtuel, plus il va vouloir interagir avec le système. Powers & al [4] ont ainsi mesuré le temps que l'utilisateur passait à discuter avec le robot ou l'agent virtuel. Ce temps étant plus long pour le robot, ils en ont déduit que l'engagement de l'utilisateur est plus fort pour le robot que pour l'agent virtuel. L'utilisateur va également être plus attentif à ce que fait ou dit le robot, comme le montrent Wainer & al [12]. Les robots sont jugés plus divertissants que les agents virtuels. Ils sont considérés comme plus intéressants et plus agréables à regarder que les agents virtuels d'après Wainer & al [13]. De même, Lee & al [16] ont montré que les participants évaluent plus positivement le robot et les interactions qu'ils ont eues avec le robot que pour l'agent virtuel.
Lorsque l'agent doit aider l'utilisateur à accomplir une tâche, le robot est encore une fois considéré comme meilleur. L'utilisateur a l'impression d'être plus aidé par le robot. D'après Wainer & al [13], dans un contexte de jeu, les conseils donnés par le robot sont perçus comme plus valides et plus utiles que ceux de l'agent virtuel. Dans un contexte plus éducatif, les utilisateurs pensent que le robot de Zlotowski [17] les a aidés à se concentrer sur leur tâche.

Les robots sont ainsi plus attrayants et mieux jugés par les utilisateurs que les agents virtuels. Cela va les amener à être plus impliqués dans les tâches qu'ils doivent réaliser, et ces tâches seront rendues plus agréables.

D. Attitude

Par l'intermédiaire d'un post-questionnaire, Powers & al [4] ont évalué l'attitude des participants vis à vis des robots et des agents dans les différentes conditions. Les auteurs ne trouvent pas de différences entre les deux conditions agent mais trouvent des résultats significatifs dans les autres cas. Ainsi, les auteurs montrent que les utilisateurs trouvent le robot co-localisé plus sensible, compétent, respectueux et digne de confiance que le robot éloigné. Les auteurs montrent la même chose entre le robot éloigné et les agents virtuels. Par ailleurs, les utilisateurs attribuent plus de traits de personnalité aux robots qu'aux agents virtuels. En résumé, les utilisateurs ont tendance à avoir une attitude plus positive vis à vis du robot co-localisé que vis à vis du robot éloigné et des agents.
Cependant, ces résultats ne concordent pas avec ceux de Bartneck et Christoph [19] qui trouvent que les robots n'ont pas plus d'effet sur les émotions des utilisateurs que les agents virtuels.

Finalement, les utilisateurs préfèrent globalement interagir avec des robots qu'avec des agents virtuels. Ils les trouvent

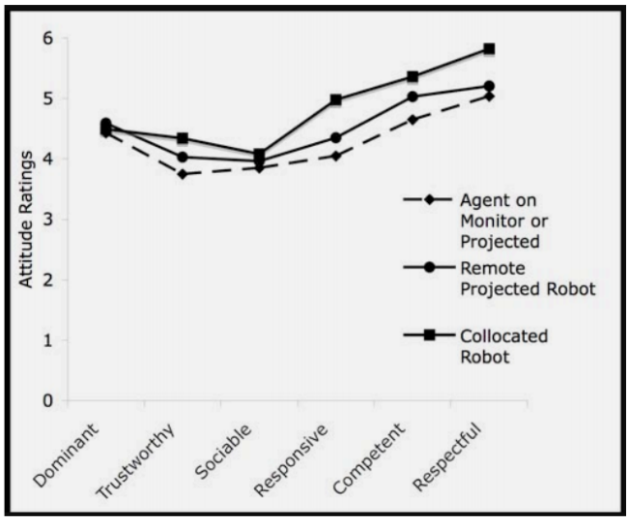


FIGURE 4: Évaluation de l'attitude du participant vis a vis du modérateur dans les différentes conditions. Power & al [4].

plus engageants et les apprécient plus. De plus, les utilisateurs considèrent le robot plus utile pour mener à bien leur tâche que l'agent virtuel. Par ailleurs, le sentiment de présence semble être plus important lorsque les utilisateurs interagissent avec un robot plutôt qu'avec un agent.

E. Taille

La taille du robot peut également avoir une influence sur l'utilisateur. Grâce aux travaux de Huang & al [20] et de Tan et Czerwinski [21], Powers & al [4] émettent l'idée selon laquelle les robots ont un impact social plus important que les agents virtuel car ils sont globalement plus grands et plus gros. En effet, Huang & al [20] ont rendu des individus artificiellement plus grands ou plus petits lors d'une communication par vidéo grâce à un jeu de caméras et ont observé leurs influences dans une tâche de décision collective. Les auteurs constatent une influence sociale plus importante lorsque les individus été rendu plus grands que lorsqu'il étaient rendus plus petits. En outre Tan et Czerwinski [21] montrent qu'un écran plus grand a tendance à être plus regardé et à avoir un impact social plus important qu'un écran plus petit. Powers & al [4] généralisent ces deux études pour formuler leurs hypothèses dans le contexte de l'interaction entre humain et système artificiel. Cependant, ils ne trouvent aucune différence significative entre leurs conditions, semblant révéler que la taille de l'interlocuteur artificiel n'a pas d'impact social sur l'utilisateur.
Ces résultats sont concordants à ceux obtenus par Kiesler & Goetz [22]. Les auteurs évaluent l'influence de la forme du robot dans deux conditions. Dans la première, le robot est de taille comparable à celle d'un humain tandis que dans la seconde, le robot est de taille comparable à celle d'un animal de compagnie. Ils montrent que les utilisateurs discutent de la même manière avec le robot, quelque soit sa taille.

La taille ne semble donc pas avoir d'influence particulière même si un nombre plus important d'études permettrait d'étayer ce point et de conclure plus confortablement.

III. Les avantages de l'agent virtuel

Malgré une préférence générale pour les agents robotiques, certains critères restent en faveur de l'utilisation des agents virtuels. Certaines tâches semblent être mieux remplies auprès d'un agent que d'un robot comme le montrent les paragraphes suivants.

A. Divulgation d'information personnelle

Powers & al [4] montrent que la présence physique semble réduire la divulgation d'informations personnelles sensibles. Ainsi avec l'agent virtuel les participants ont donné plus d'informations sur leurs comportements négatifs que les participants en conversation avec un robot. Pour les auteurs, cela est cohérent avec le fait que ce sont des révélations qui peuvent nous embarrasser devant d'autres personnes, or les robots sont vus comme plus proches d'une personne que les agents virtuels (plus de présence sociale). Une tâche demandant l'implication personnelle de l'utilisateur va être ainsi source d'inconfort et de stress social pour celui-ci. On peut même aller plus loin dans ce raisonnement : dans l'étude de Sproull & al [23] , lorsque les participants doivent remplir un test psychologique, ils sont plus à l'aise lorsque ce test est écrit uniquement que lorsque c'est un agent virtuel qui le présente,et ce, même si les utilisateurs avaient bien compris que l'agent ne correspondait pas à une personne réelle.

Les utilisateurs vont donc être plus en confiance avec l'agent virtuel qu'avec le robot pour divulguer des informations personnelles, car pour eux le robot correspond plus à une véritable personne. Ceci est cohérent avec le fait que les robots vont susciter un sentiment de présence sociale plus fort que pour les agents virtuels.

B. Rappel de la conversation

En outre, selon Powers & al [4], les utilisateurs se souviennent beaucoup mieux de la conversation lorsqu'ils interagissent avec l'agent virtuel plutôt qu'avec le robot. Il n'y a pas de différence entre les deux conditions agent. De plus, les participants se souviennent mieux de la conversation dans la condition robot éloigné que dans la condition robot co-localisé.
Cependant, du fait de la pauvreté des études posant ces hypothèses, il est difficile de conclure. Les agents semble plus performants dans des tâches nécessitant une mémorisation mais des études complémentaires doivent être mises en place pour appuyer cet argument.

En résumé, malgré un nombre conséquent d'arguments en faveur des robots dans l'interaction sociale auprès des humains, les agents virtuels restent meilleurs dans certaines circonstances. Les utilisateurs se montrent plus confiant et ont une tendance plus importante à divulguer des informations personnelles ainsi qu'un meilleur souvenir de l'interaction une fois celle-ci terminée.

IV. Discussion

A. Performance de la tâche

Zlotowski [17] compare la performance des utilisateurs entre la condition robot et la condition agent virtuel. Il montre que les participants dans la condition robot ont mis plus de temps à faire la tâche que les participants dans la condition agent. Cependant, lorsqu'il sépare l'analyse statistique en deux, avec la première moitié des essais dans un groupe de données et la seconde moitié des essais dans l'autre il trouve une différence significative uniquement pour la première moitié des données. Les temps de réponse diminuent de la même façon pour les deux conditions dans la seconde moitié des données. L'auteur suppose que dans la condition robot, celui-ci agit comme un "leurre" et distrait le participant. Ainsi lorsque le participant s'est habitué au robot on retrouve le même type de performance que dans la condition agent. Zlotowski suppose également qu'à la fin de l'expérimentation, les participants sont plus focalisés sur la tâche en elle même que sur les modérateurs. De plus, Zlotowski ne trouve pas de différence significative dans le nombre d'erreurs commises par les participants dans les deux conditions expérimentales, indépendamment du modérateur. En outre, dans leur revue de la littérature Dehn & al [24] estiment qu'il n'y a pas de résultat convainquant de l'apport d'un agent sur la performance des utilisateurs par rapport à pas d'agent.

Les modérateurs ne semblent donc pas avoir d'effet sur la performance de la tâche, mais des études supplémentaires seraient nécessaires pour tester d'autres conditions expérimentales et permettre une conclusion plus solide.

B. Les agents mixte

Quelques personnes ont commencé à développer un agent mixte entre le robot et l'agent virtuel, qui aurait les avantages du robot, comme la présence dans le monde physique, ainsi que les avantages de l'agent virtuel, comme la capacité d'expression notamment au niveau des émotions. Ce genre d'agent social se situe au centre du continuum de Milgram & al [1] (Figure 1). Un exemple très ressemblant à un humain est l'agent mixte U-Tsu-Shi-O-Mi (Figure 5) [25]. Il possède une partie robot répliquant un corps humain, recouverte d'un tissu vert. L'agent virtuel est alors projeté sur ce robot physique, au moyen de lunettes 3D que doit porter l'utilisateur. Celui-ci peut alors interagir avec l'agent et le toucher. Les personnages ainsi créés sont visibles sous tous les angles et ne souffrent pas d'une perte de visibilité avec la distance, contrairement à un agent qui aurait un simple écran au-dessus du robot physique pour montrer l'agent virtuel. De plus, pour Al Moubayed & al [26], projeter une tête 3D sur le corps du robot permet d'avoir une tête plus réaliste, sans contrôle moteur, Ainsi la tête va s'affranchir d'éventuels bruits de moteur, ce qui est intéressant dans le cas où le robot doit parler. Cependant, si l'agent virtuel projeté sur le corps du robot est capable d'exprimer des émotions visuellement, Al Moubayed & al précisent que cette expression est limitée à des mouvements de

FIGURE 5: U-Tsu-Shi-O-Mi. Soshi & al [25].

faible amplitude pour que ce soit réaliste. Pour avoir de plus grands mouvements, comme par exemple ouvrir la bouche en grand, il faudrait ajouter du mouvement physique sur le robot, et donc avoir des contraintes mécaniques. Un autre inconvénient également cité par Al Moubayed & al [26] est les conditions de luminosité : si la lumière ambiante est trop forte, on risque de mal voir l'agent projeté.

D'autres idées d'agent mixte sont actuellement explorées, comme par exemple le robot aspirateur Jeeves (Figure 6) de Young & al [27], dont l'agent virtuel associé est en fait un personnage de type cartoon. Ce type de personnage permet de simplifier et d'exagérer les expressions du visage afin de rendre l'interaction avec l'utilisateur plus intuitive, compréhensible par n'importe qui, sans problème de langage. Cela permet également à l'utilisateur de comprendre plus facilement ce qui se passe pour le robot, comme par exemple comprendre que le robot a besoin d'être rechargé en montrant une tête fatiguée. De plus, les auteurs ont donné à Jeeves la possibilité de laisser des traces, comme des bulles de cartoon lui permettant d'étiqueter un objet ou même ses véritables traces afin d'indiquer à l'utilisateur où il a déjà nettoyé la pièce. Bien que les utilisateurs ayant testé Jeeves l'aient trouvé intéressant et l'aient anthropomorphisé, ils ont soulevé quelques problèmes, notamment au niveau de la qualité de l'animation ainsi qu'au fait que le type de personnage devrait être adapté à la tâche.

Bien qu'il n'y ait encore peu d'études sur le sujet, les agents mixtes même s'ils ne sont pas exempts de défauts, semblent une piste intéressante pour tirer le meilleur à la fois des robots et des agents virtuels.

V. CONCLUSION

Les robots sont très appréciés des utilisateurs. Grâce à leur présence physique et leur capacité d'interaction avec l'utilisateur, les robots donnent un fort sentiment de présence, ils sont attractifs et divertissants pour l'utilisateur qui va rechercher les interactions avec lui. Malgré tout, les agents virtuels possèdent quelques avantages : leur tête leur permet

FIGURE 6: Jeeves. Young & al [27].

d'exprimer toute une palette d'émotions, et les utilisateurs semblent plus enclins à se confier à eux ainsi qu'à retenir les informations données au cours de la conversation qu'avec un robot.

On peut remarquer cependant que la qualité de représentation des agents virtuels utilisés dans les différentes études n'est pas toujours très bonne, surtout alors qu'ils sont concurrencés par des personnages de jeux vidéos de très bonne qualité. Les utilisateurs sont donc peut être habitués à voir des personnages très réalistes et très bien dessinés. En voyant les représentations des agents virtuels, les utilisateurs sont alors déçus et le personnage perd de son attrait. On peut donc espérer que si la qualité des agents virtuels s'améliore, ils seront plus attrayants, plus attachants, et auront éventuellement des effets plus positifs.

Tous les résultats évoqués ici doivent cependant être traité avec précaution, pour deux raisons principales, comme l'expliquent Dehn et Mulken [24]. La première est qu'il y a peu d'études sur le sujet. La deuxième est que les études sont très variables. En effet le robot et l'agent virtuel sont le plus souvent différents entre les études, peut-être que les utilisateurs préfèrent une représentation plutôt qu'une autre. Il pourrait être intéressant dans une étude de comparer différentes représentations d'agents virtuels, comme la couleur des cheveux par exemple.

De plus, bien que les utilisateurs soient plus attirés par les robots, les performances des agents robots et des agents vir-

tuels dépendent vraisemblablement de la tâche. Par exemple, les robots sont appréciés pour leur côté distrayant, ils pourraient donc être utiles dans des tâches d'apprentissage. Les agents virtuels sont préférés dans la divulgation d'informations personnelles, ils seraient donc plus utiles dans des tâches où les utilisateurs doivent s'impliquer personnellement. Il faudrait donc adapter l'aspect de l'agent, mais également son comportement à la tâche que l'utilisateur doit effectuer.

RÉFÉRENCES

[1] P. Milgram, H. Takemura, A. Utsumi, and F. Kishino, "Augmented reality : A class of displays on the reality-virtuality continuum," in *Photonics for Industrial Applications*. International Society for Optics and Photonics, 1995, pp. 282–292.

[2] T. Fong, I. Nourbakhsh, and K. Dautenhahn, "A survey of socially interactive robots," *Robotics and autonomous systems*, vol. 42, no. 3, pp. 143–166, 2003.

[3] S. Dalibard, N. Magnenat-Talmann, and D. Thalmann, "Anthropomorphism of artificial agents : a comparative survey of expressive design and motion of virtual characters and social robots," in *Workshop on Autonomous Social Robots and Virtual Humans at the 25th Annual Conference on Computer Animation and Social Agents (CASA 2012)*, 2012.

[4] A. Powers, S. Kiesler, S. Fussell, and C. Torrey, "Comparing a computer agent with a humanoid robot," in *Human-Robot Interaction (HRI), 2007 2nd ACM/IEEE International Conference on*. IEEE, 2007, pp. 145–152.

[5] T. Holz, M. Dragone, and G. M. O'Hare, "Where robots and virtual agents meet," *International Journal of Social Robotics*, vol. 1, no. 1, pp. 83–93, 2009.

[6] J. F. Werker and R. C. Tees, "Influences on infant speech processing : Toward a new synthesis," *Annual review of psychology*, vol. 50, no. 1, pp. 509–535, 1999.

[7] V. Bruce and A. Young, *In the eye of the beholder : the science of face perception.* Oxford University Press, 1998.

[8] R. Blake and M. Shiffrar, "Perception of human motion," *Annu. Rev. Psychol.*, vol. 58, pp. 47–73, 2007.

[9] C. Zanbaka, P. Goolkasian, and L. Hodges, "Can a virtual cat persuade you ? : the role of gender and realism in speaker persuasiveness," in *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in computing systems*. ACM, 2006, pp. 1153–1162.

[10] C. Nass, J. Steuer, and E. R. Tauber, "Computers are social actors," in *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. ACM, 1994, pp. 72–78.

[11] J. Yamato, K. Shinozawa, F. Naya, and K. Kogure, "Evaluation of communication with robot and agent : Are robots better social actors than agents," in *Proc. of the 8th IFIP TC. 13 Int. Conf. on Hum.-Comput. Interact.(INTERACT'01), Tokyo, Japan*, 2001, pp. 690–691.

[12] J. Wainer, D. J. Feil-Seifer, D. Shell, M. J. Matarić *et al.*, "The role of physical embodiment in human-robot interaction," in *Robot and Human Interactive Communication, 2006. ROMAN 2006. The 15th IEEE International Symposium on*. IEEE, 2006, pp. 117–122.

[13] J. Wainer, D. J. Feil-Seifer, D. Shell, M. J. Mataric *et al.*, "Embodiment and human-robot interaction : A task-based perspective," in *Robot and Human interactive Communication, 2007. RO-MAN 2007. The 16th IEEE International Symposium on*. IEEE, 2007, pp. 872–877.

[14] R. B. Zajonc *et al.*, *Social facilitation*. Research Center for Group Dynamics, Institute for Social Research, University of Michigan, 1965.

[15] E. Bradner and G. Mark, "Social presence with video and application sharing," in *Proceedings of the 2001 international ACM SIGGROUP conference on Supporting group work*. ACM, 2001, pp. 154–161.

[16] K. M. Lee, Y. Jung, J. Kim, and S. R. Kim, "Are physically embodied social agents better than disembodied social agents ? : The effects of physical embodiment, tactile interaction, and people's loneliness in human–robot interaction," *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 64, no. 10, pp. 962–973, 2006.

[17] J. Zlotowski, "Comparison of robots' and embodied conversational agents' impact on users' performance," 2010.

[18] K. L. Nowak and F. Biocca, "The effect of the agency and anthropomorphism on users' sense of telepresence, copresence, and social presence in virtual environments," *Presence*, vol. 12, no. 5, pp. 481–494, 2003.

[19] C. Bartneck, "Interacting with an embodied emotional character," in *Proceedings of the 2003 international conference on Designing pleasurable products and interfaces*. ACM, 2003, pp. 55–60.

[20] W. Huang, J. S. Olson, and G. M. Olson, "Camera angle affects dominance in video-mediated communication," in *CHI'02 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 2002, pp. 716–717.

[21] D. S. Tan and M. Czerwinski, "Information voyeurism : Social impact of physically large displays on information privacy," in *CHI'03 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. ACM, 2003, pp. 748–749.

[22] S. Kiesler and J. Goetz, "Mental models and cooperation with robotic assistants chi 2002 extended abstracts," 2002.

[23] L. Sproull, M. Subramani, S. Kiesler, J. H. Walker, and K. Waters, "When the interface is a face," *Human-Computer Interaction*, vol. 11, no. 2, pp. 97–124, 1996.

[24] D. M. Dehn and S. Van Mulken, "The impact of animated interface agents : a review of empirical research," *International journal of human-computer studies*, vol. 52, no. 1, pp. 1–22, 2000.

[25] M. Shoji, K. Miura, and A. Konno, "U-tsu-shi-o-mi : the virtual humanoid you can reach," in *ACM SIGGRAPH 2006 Emerging technologies*. ACM, 2006, p. 34.

[26] S. Al Moubayed, J. Edlund, and J. Beskow, "Taming mona lisa : communicating gaze faithfully in 2d and 3d facial projections," *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems*, vol. 1, no. 2, p. 25, 2012.

[27] J. E. Young, M. Xin, and E. Sharlin, "Robot expressionism through cartooning," in *Proceedings of the ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction*. ACM, 2007, pp. 309–316.

Robotique et Interfaces Cerveau-Machines : un etat de l'art

Alex Jardillier
Etudiant en M2R Sciences Cognitives
INP
Grenoble, France
ajardillier@gmail.com

Marc-Aurèle Rivière
Etudiant en M2R Sciences Cognitives
INP
Grenoble, France
marc.aurele.riviere@gmail.com

***Abstract*— Les Interfaces Cerveau-Machine (ICM) sont le fruit d'une recherche pluridisciplinaire en pleine expansion, permettant la communication entre un individu et une machine par le seul biais de son activité cérébrale. Cette communication requiert l'emploi de méthodes d'acquisition et de classification de l'activité cérébrale de l'individu. Cette présentation aura pour objectif de passer en revue les différentes méthodes d'acquisition et de classification des signaux cérébraux, mais aussi les différents types d'ICM ainsi que les applications qui en sont actuellement faites, notamment dans le domaine médical et de la robotique.**

Keywords*— *Interfaces cerveau-machine, EEG, applications, robotique.

I. Introduction

Les Interfaces Cerveau-Machine (ICM) sont des dispositifs qui permettent la communication entre une machine et un individu par l'intermédiaire de l'activité cérébrale de celui-ci.

Ces dispositifs s'inscrivent dans le champ de recherche plus général des Interfaces Homme-Machine (IHM) qui s'intéresse à l'ensemble des dispositifs et méthodes permettant à un individu d'interagir, de contrôler et de communiquer avec une machine. Le domaine des IHM est un domaine vaste à la frontière entre informatique, sciences de l'ingénieur, sciences cognitives, ergonomie, biologie et communication. Son but est la conception de systèmes permettant une communication efficace et ergonomique entre un individu et une machine.

L'objectif premier des ICM est de permettre à des individus qui, suite à une maladie ou un accident, ne sont plus aptes à réaliser certaines actions telles que parler, se mouvoir, saisir des objets; de récupérer des possibilités d'action sur leur environnement, et donc un certain degré d'autonomie de vie. En effet, ces interfaces leurs permettent de contrôler des dispositifs électroniques (prothèses, bras articulés, synthétiseurs vocaux, fauteuils roulants …) en transposant leur activité cérébrale en commandes pour ces dispositifs d'assistance.

Les domaines d'application de ces technologies sont très nombreux: exosquelettes, prothèses, parole synthétique, télé-opérations, ou encore le contrôle de fauteuils roulants; et s'étendent même aujourd'hui à des domaines plus grand public tels que le contrôle de jouets volants [3] ou encore de jeux vidéo [2].

Les ICM font appel à des techniques variées afin de mesurer et d'interpréter l'activité cérébrale des sujets, techniques que nous examinerons dans la section II de cette présentation. La section III sera quant à elle consacrée à un état de l'art des applications des ICM dans le domaine de la robotique.

II. Les Interfaces Cerveau-Machine

De manière générale, les ICM consistent en une succession d'étapes d'acquisition (mesures neurophysiologiques), de traitement (extraction de caractéristiques) et de classification (par Machine Learning) des signaux résultant de l'activité cérébrale d'un individu. Les classes résultant de cette dernière étape sont associées à des actions à effectuer par la machine, actions qui résulteront la plupart du temps en un feedback qui sera transmis au sujet, lui permettant d'adapter son activité cérébrale, dans la mesure du possible, afin d'affiner son contrôle de la machine (voir figure 1).

Dans cette première partie, nous nous intéresserons aux différents types de signaux mesurables, aux différentes techniques d'interprétations et de classification des données mesurées, et enfin aux différents types d'ICM utilises de nos jours.

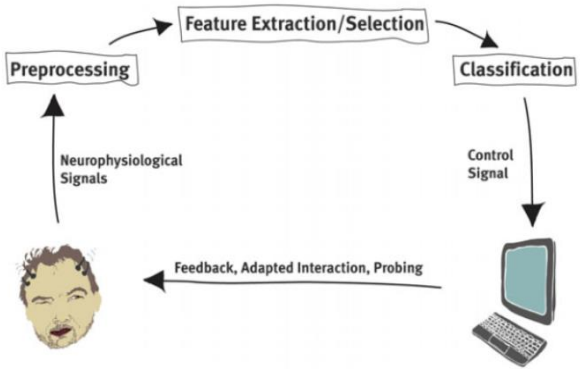


Fig. 1. Représentation du fonctionnement d'une ICM, extraite de [1]

A. *L'acquisition des signaux cérébraux*

A la base de toute ICM, l'on retrouve la nécessité de détecter des invariants parmi les caractéristiques du signal résultant de l'activité cérébrale d'un sujet. Ces caractéristiques invariantes doivent répondre a deux impératifs afin d'être utilisées comme support dans une ICM :

- Permettre de catégoriser comme similaires les signaux d'activités cérébrales faisant suite à des tâches similaires (par exemple, imaginer un mouvement vers le haut de son bras droit).
- Permettre de catégoriser comme différents les signaux d'activités cérébrales faisant suite à des tâches différentes (par exemple, penser à une pelouse vs penser à des nuages).

Les caractéristiques du signal cérébral répondant à ces deux prérogatives pourront être considérées comme des marqueurs sélectifs d'une activité cérébrale donnée : elles permettront une classification efficace de l'activité cérébrale du sujet, classification qui est à la base du contrôle systématique de la machine par l'ICM.

Parmi l'ensemble des caractéristiques étudiées de l'activité cérébrale humaine, les candidats apparaissant comme idéaux pour répondre à cette double prérogative sont les Potentiels Evoqués (PE). Les PE sont des modifications systématiques et irrépressibles du potentiel électrique produit par le système nerveux en réponse à une stimulation sensorielle externe (on parle de PE Exogène), ou à un évènement interne tel qu'une modification de notre attention (on parle de PE endogène, ou Potentiel Induit). Les PE peuvent être mesurés par des mesures profondes (techniques invasives), ou des mesures de surface (techniques non-invasives).

1) Les mesures invasives

Les mesures invasives se basent sur l'implantation d'électrodes profondes dans des zones précises du cerveau afin de mesurer les variations de l'activité électrique de populations spécifiques de neurones.

Ces mesures permettent d'avoir une excellente résolution temporelle (< 1 ms) et une très bonne résolution spatiale (de l'ordre du millimètre, en fonction du type d'électrode utilisé) et sont très robustes aux artefacts. D'un point de vue technique, ces mesures semblent idéales pour la détection précise d'invariants, dans le temps et dans l'espace, du signal électrique cérébral.

Cependant, ces méthodes restent peu répandues du fait de la nécessité d'une intervention chirurgicale, ainsi que du risque de lésions ou d'infections post-opératoires : dans la pratique, seuls les patients pour lesquels l'implantation d'une électrode cérébrale profonde est une nécessité médicale, par exemple pour localiser un foyer épileptogène pharmaco-résistant, sont sollicités pour des ICM basées sur des mesures profondes. De plus, la durée de vie de ces électrodes est, encore aujourd'hui très limitée : la précision de leur mesures se dégrade en 2-3 années seulement à cause de l'accumulation de tissu cicatriciel autour de l'électrode.

2) Les mesures non-invasives

A l'inverse, les mesures non-invasives sont les mesures ne nécessitant pas d'interventions chirurgicales : elles reposent sur la mesure de l'activité électrique (Electro-Encéphalographie, ou EEG) ou magnétique (Magnétoencéphalographie, ou MEG) à la surface du scalp du sujet.

L'EEG consiste à poser des électrodes sur le cuir chevelu d'un individu pour mesurer son activité cérébrale au cours du temps, par le biais des variations locales du champ électrique à la surface de son crâne.

Les mesures faites en EEG ont une excellente résolution temporelle (< 1ms), sont faciles à mettre en place (appareillage simple et non-invasif), et peu couteuse, ce qui en fait une technique d'acquisition très utilisée.

Cependant, cette technique possède une piètre résolution spatiale (de l'ordre du centimètre). En effet, une électrode donnée enregistre un mélange de différentes sources dont le signal va varier au cours du temps. Isoler les différents signaux et déterminer leur provenance est une tâche très complexe faisant intervenir des techniques de séparation de sources avancées. De plus, les potentiels électriques sont fortement affectés par les tissus qu'ils traversent, résultant en un rapport signal sur bruit très faible, surtout pour les sources profondes : la qualité maximale est généralement obtenue pour les mesures faites sur le cortex cérébral.

Malgré ces inconvénients, cette méthode de mesure reste très pertinente dans le cadre des ICM :

[4] ont pu faire réaliser des mouvements multidimensionnels à un bras robotique contrôlé par EEG, par un sujet souffrant d'un handicap moteur sévère.

[5] sont quant à eux allés jusqu'à obtenir une précision de 95% lors de la sélection d'une commande (parmi 5 possibles) pour un robot humanoïde contrôlé par EEG.

La MEG fonctionne selon des principes similaires à l'EEG, mais elle détecte les variations locales des champs magnétiques à la surface du crâne, résultant de l'activité cérébrale sous-jacente.

Cette méthode possède également une excellente résolution temporelle (< 1 ms) ainsi qu'une résolution spatiale un peu meilleure que celle de l'EEG. [6] ont montré qu'il était possible de classifier efficacement les activités cérébrales de sujets effectuant des mouvements du poignet dans 4 directions grâce a des mesures en MEG.

Cependant, l'utilisation de la MEG comme méthode d'acquisition dans le cadre d'une ICM reste rare au vu de la complexité de la mise en place d'une telle méthode, de l'encombrement du matériel ainsi que de son coût.

Enfin, l'IRMf (Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle) permet de détecter les variations de l'activité cérébrale par le biais des variations locales du niveau de

perturbation d'un champ magnétique imposé. Ce niveau de perturbation est proportionnel aux variations locales du débit sanguin (et de l'oxygénation du sang), variations elles-mêmes dépendantes de l'activité des populations de neurones présentes.

L'IRMf possède une excellente résolution spatiale (< 1 mm), mais une piètre résolution temporelle (de l'ordre de la seconde). [7] ont montré que cette technique pouvait être utilisée pour contrôler un robot humanoïde à distance, par imagerie fonctionnelle du cortex moteur des sujets. Cependant, l'utilisation de cette méthode d'acquisition reste anecdotique dans le cadre d'une ICM, et ce pour plusieurs raisons :

- La très faible résolution temporelle de cette technique en fait un piètre candidat pour un contrôle online, nécessitant une certaine "réactivité" sur le plan temporel.
- L'appareillage d'une IRM est très coûteux et très encombrant.
- Le champ magnétique intense produit par l'IRM proscrit l'utilisation de tout appareil électronique aux environs, obligeant le contrôle d'une éventuel machine par ce biais de se faire à distance.

B. La classification des signaux cérébraux

Après avoir acquis les signaux cérébraux, la classification a pour objectif de comparer leurs caractéristiques pour déterminer l'action entreprise par le sujet. Il faut, dans un premier temps, extraire les traits caractéristiques des signaux bruts. Ces caractéristiques peuvent être de nature spectrale [8], se baser sur des variations d'amplitude, utiliser des paramètres auto-régressifs [9] ou encore se servir des informations temps-fréquence. Il est important de noter que les signaux relevés sont bruités, non stationnaires (les propriétés varient en fonction du temps) et de très haute dimensionnalité. Pour pallier aux variations temporelles, la technique la plus utilisée consiste en l'extraction des informations sur plusieurs segments temporels pour ensuite les concaténer dans un seul et même vecteur [10].

C'est à partir de ce vecteur de caractéristiques que l'on va utiliser différents algorithmes de classification afin de déterminer les marqueurs sélectifs d'une tâche ou d'une stimulation donnée. Il existe des algorithmes statiques du type Perceptron Multicouches, qui consistent en la soumission d'une base d'apprentissage à un réseau de neurones artificiels. Par la suite lorsque le Perceptron sera stimulé par une entrée, donc un nouveau vecteur de caractéristiques, le réseau effectuera une classification. La sortie pourra être directement interprétable en une commande machine. Toutefois le perceptron multicouche étant une méthode statique, il est impossible de prendre en compte les informations temporelles; on soumet un vecteur et non une séquence temporelle. Le modèle de Markov caché (HMM), fréquemment utilisé pour la reconnaissance de la parole, permet de répondre à ce problème temporel. D'autres algorithmes de classification comme celui de Bayes utilisent les probabilités d'apparition des vecteurs, ou bien vont chercher à procéder à des discriminations vectorielles. Le type d'algorithme est alors choisi en fonction de performances souhaitées, et selon la taille de la base d'apprentissage. Par exemple un Perceptron Multicouche demandera un entraînement conséquent et les variations d'apprentissage peuvent nettement influencer les poids synaptiques, alors qu'un algorithme de type discriminant sera moins sensible. De plus, la haute dimensionnalité des vecteurs caractéristiques influe directement sur la taille de la base d'apprentissage ; en toute logique plus il y a d'information à retenir et plus l'apprentissage devra être important [11].

Il est aussi nécessaire d'établir un compromis entre le biais et la variance du modèle, à savoir minimiser l'écart entre la sortie estimée et la sortie désirée du classifieur. En effet l'erreur quadratique moyenne, qui définit la performance du modèle de classification, doit être la plus faible possible : elle résulte de l'addition du bruit, du biais et de la variance [12]. L'idée est alors de jouer sur ces deux derniers paramètres afin d'obtenir une erreur optimale et des performances stables.

C. Les types d'ICM et leurs applications

Pour la suite de cette présentation, nous allons nous focaliser sur les ICM se basant sur des méthodes d'acquisition de type EEG, qu'elles soient de surface ou via électrodes profondes (EEG intracrânienne). En effet, ces méthodes sont fortement majoritaires dans la littérature du faite de leur bonne résolution temporelle (propice au contrôle online d'une machine) ainsi qu'au faible coût et encombrement de l'appareillage.

En nous basant sur la classification présentée par [1], nous allons distinguer 3 grandes catégories d'ICM : actives, réactives et passives. Cette classification se base sur la nature de l'élément déclencheur du signal mesuré. En effet, cet élément déclencheur peut être :

- Exogène (l'activation cérébrale est dépendante de la présentation d'un stimulus au sujet par la machine) ou endogène (l'activation ne dépend d'aucun stimulus extérieur au sujet).
- Actif (dépendant de la volonté du sujet, d'une action consciente de celui-ci sur la machine), ou passif (réaction du robot à un état cognitif ou affectif du sujet).

La figure 2 résume visuellement ce classement des ICM.

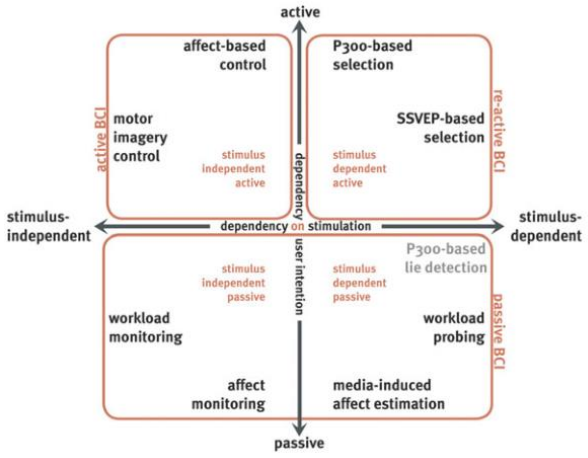


Fig. 2. Classification des différents types d'ICM par [1]

1) Les ICM Passives

Les ICM passives regroupent les différentes ICM où l'état cérébral du sujet (niveau d'attention, état émotionnel, charge cognitive ...) est surveillé en arrière-plan afin que la machine puisse automatiquement réguler son activité en fonction de celui-ci.

De nombreuses applications pourraient être envisagées à ce monitoring passif de l'état du sujet, comme par exemple un ajustement automatique du niveau de difficulté d'un jeu ou d'un programme d'e-learning pour palier à une frustration de l'utilisateur, ou, à l'inverse, à l'ennui de celui-ci [13, 14]. Cela permettrai de maintenir le sujet engagé dans la tâche et d'éviter qu'il soit frustré face à une tâche incomprise où trop difficile.

D'autres types d'ICM où ce monitoring passif de l'état du sujet serait effectué en corrélation à la présentation de stimuli pourraient être envisagés. Il s'agit donc ici d'analyser les PE en réponse à un stimulus généré par la machine afin de caractériser l'état du sujet. Parmi les diverses applications possibles à ces ICM, nous pouvons mentionner :

[15] ont montré que l'analyse des PE mesurés en réponse à un stimulus audio simple suffisait pour évaluer la charge cognitive de sujets engagés dans un environnement riche en stimulations (ici un jeu de tir). Cette mesure rapide et peu distrayante pourrait donc être utilisée pour évaluer indirectement l'attention et l'engagement d'un sujet dans une tâche.

[16] ont montré qu'il était possible d'analyser les ERN (Error-Related Negativity) qui apparaissent lorsque le sujet constate une erreur de la machine afin de fluidifier l'interaction homme-machine en permettant à celle-ci de s'adapter automatiquement aux réactions de l'utilisateur.

[17] ont proposé un détecteur de mensonge basé sur l'analyse de la P300 (*P300-based Guilty Knowledge Test*), avec lequel ils ont pu discriminer les sujets coupables des innocents à 86%.

[18] ont proposé un système de tagging affectif automatique de contenu multimédia en combinant les réponses faciales et neurophysiologiques de sujets visionnant ce contenu. Ce système leur a permis de mettre en place une suggestion automatique de contenu multimédia basée sur ces tags : suggérer à l'utilisateur du contenu multimédia évoquant des émotions similaires à celles évoquées par ce qu'il écoute actuellement.

[19] ont développé une ICM combinant EEG et IRMf afin de permettre aux patients atteints de la maladie d'Alzheimer (à un stade où une réponse consciente est très difficile à formuler pour eux), d'exprimer leur accord ou désaccord face une proposition par le biais du monitoring de leur réponse affective suite à la présentation de cette proposition.

A l'instar de la communication humaine, l'objectif général derrière les ICM Passives serait donc de rendre la communication cerveau-machine « humaine » en permettant à notre interlocuteur, ici la machine, de faire des inférences sur notre état mental et/ou affectif sur la base de signes qui lui sont observables, et d'adapter ses actions en conséquence.

2) Les ICM Actives

Les ICM actives regroupent les différents ICM pour lesquelles l'utilisateur peut influer la réponse de la machine par le biais de modifications conscientes de son état mental (attention, état affectif …).

Ces approches sont plus connues sous l'appellation générique de techniques de neuro-feedback : pousser l'utilisateur a atteindre un certain état cognitif ou affectif en lui fournissant des indices sur son état actuel. L'utilisateur peut alors modifier son état mental jusqu'à ce que celui-ci converge vers un état "cible" désiré.

[20] a montré qu'il était possible, par des techniques de neurofeedback, d'améliorer l'état émotionnel de patients ayant des troubles de l'anxiété ou des troubles dépressifs.

[21] ont également démontré l'efficacité d'un traitement de l'hyperactivité (ADHD) par des techniques de neurofeedback, notamment pour les dimensions de l'hyperactivité et de l'impulsivité.

3) Les ICM Réactives

Les ICM réactives concernent les ICM où l'utilisateur va réagir consciemment à l'apparition d'un stimulus ou d'une information. C'est le paradigme "classique" des ICM où la machine communique consciemment avec l'utilisateur par le biais d'une interface, typiquement visuelle, où la machine affiche des options à destination de l'utilisateur qui pourra choisir de réagir à une option donnée afin de conditionner l'action suivante de la machine.

Un exemple classique serait la sélection d'option par la P300. La P300 est un PE apparaissant 300ms après un évènement extérieur inattendu : c'est une réponse caractéristique de la surprise de l'utilisateur face a un changement soudain et inattendu d'un objet de son environnement. De manière générale, la P300 est utilisée pour sélectionner une option parmi un panel de choix. Elle est généralement obtenue lorsque l'utilisateur visualise un objet et que celui-ci change soudainement (on parle de flash).

Quelques exemples notables d'ICM utilisant la P300 :

Le paradigme d'épellation basée sur la P300 [22], qui permet d'épeler un texte en réagissant aux illuminations successives de lettres de l'alphabet sur un écran.

[2] ont développé un prototype du jeu "Brain Invader", une réplique du classique "Space Invader" contrôlé uniquement par une ICM basée sur la détection de P300.

Un autre exemple classique d'ICM réactive serait l'utilisation de SSVEP (*Steady-State Visual Evoked Potential*) pour contrôler une interface ou donner des commandes à une machine (sélection d'options). Les SSVEP sont des PE observés en réponse à une stimulation visuelle d'une fréquence spécifique. Leur caractéristique principale est d'être de fréquence identique (ou proportionnelle) à la fréquence du signal visuel ayant provoqué leur apparition, ce qui permet de faciliter leur classification [23, 24] Cependant, cette technique demande un entraînement plus long que la P300 et est sujette à une grande variabilité inter-sujets : la P300 reste plus majoritairement employée.

Maintenant que nous avons présenté le fonctionnement général des ICM, ainsi qu'un système permettant de les classifier, nous allons nous intéresser plus particulièrement aux applications des ICM dans le cadre de la robotique

III. ICM ET ROBOTIQUE

Certains individus peuvent être victime d'une paralysie musculaire complète résultant d'un stade avancé de sclérose ou à la suite d'accidents vasculaires cérébraux; on parle alors de *Lock-In-Sydrom* (LIS ou syndrome d'enfermement). Les patients atteints de ce syndrome sont privés de tout moyen de communication alors que leurs capacités cérébrales sont pleinement opérationnelles : lorsqu'ils veulent réaliser une action (i.e. parler, marcher, …) leurs muscles ne répondent pas. Nous allons nous concentrer, dans cette partie sur les principales applications des interfaces cerveau-machine pour aider les patients souffrant de LIS.

A. Bras articulés et chaises roulantes

Les progrès scientifiques de ces dix dernières années ont rendu possible le contrôle de bras articulés, de prothèses ou même de chaises roulantes par l'intermédiaire des ICM : ces interfaces permettent de réaliser de véritables prouesses pour aider des patients atteints du LIS à gagner en autonomie. Même si l'usage de ces techniques reste encore confiné aux laboratoires ou aux hôpitaux, de plus en plus de patients souffrant d'un handicap moteur sévère ont recourt à une craniotomie afin de se faire poser des microélectrodes dans leur cortex cérébral, dans l'objectif de pouvoir participer à ces expériences.

C'est le le cas de Jan Scheuermann, une femme de 54 ans vivant en Californie et atteinte de sclérose multiple depuis près de 14 ans. Elle se déplace en fauteuil roulant, peut sentir son corps mais est incapable de réaliser une action : son cerveau peut donner l'ordre de lever son bras mais ce dernier ne réagira pas (syndrome d'enfermement). Face à la médiatisation des techniques de contrôle par interface cerveau-machine, elle a décidé de passer le pas et de subir une intervention chirurgicale visant à placer des électrodes dans son cortex moteur.

Après seulement deux semaines, grâce à cet implant et aux travaux de [25], elle était capable de déplacer le bras robotique dans 3 dimensions. Quelques mois après l'opération, elle pouvait effectuer jusqu'à 7 mouvements différents, y compris une rotation de la main et des mouvements du pouce. Jan Scheuermann a alors la possibilité d'atteindre un objet, de le saisir, de le reposer ou encore de bouger le pouce et d'effectuer une pression entre le pouce et l'index, lui permettant de manger un morceau d'une barre de chocolat par elle-même, un objectif qu'elle s'était fixé.

Plus récemment, elle a été capable de piloter, grâce à son implant, le simulateur de vol du tout nouvel avion de chasse du pentagone : le F-35.

Les recherches menées sur le contrôle de fauteuils roulants par BCI sont moins nombreuses mais les résultats n'en sont pas moins pertinents. [26] ont établi une matrice de taille 3x3 ou chaque cellule représente une destination. En se basant sur la détection de potentiels évoqués de type P300 lorsque le patient choisi une case, le fauteuil roulant ira à la destination choisie de manière autonome. Toutefois ce type d'expérience nécessite un environnement pré-cartographié et un événement imprévu comme un obstacle pourrait entraîner un échec. Les recherches effectuées en robotique pour le déplacement, notamment en matière de programmation Bayesienne, peuvent palier à ce problème. L'idée est alors d'utiliser des priors statistiques pour permettre à la chaise roulante ne pas suivre une direction préalablement enregistrée et d'utiliser des informations issues de capteurs pour se diriger. Une illustration de cette méthodologie est présentée en figure 3.

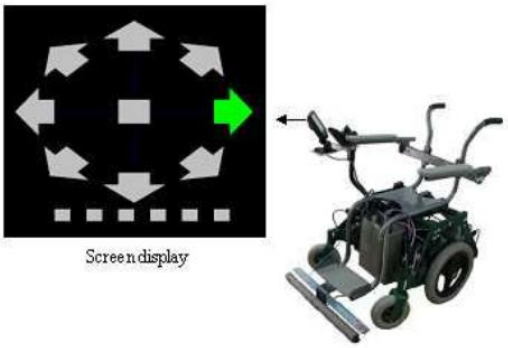


Fig. 3. Choix des directions dans l'expérience de [26]

[27] ont quant à eux utilisé l'approche Bayésienne pour améliorer la détection des potentiels évoqués.

[28] ont eu l'idée d'utiliser les signaux cérébraux acquis par EEG correspondant au mouvement du pied pour l'associer aux commandes du fauteuil électrique. Selon leurs résultats, le patient peut se déplacer et s'arrêter dans une zone voulue dans 90% des cas.

Avant 2010, les études s'intéressaient uniquement à un déplacement rectiligne. Plus récemment [29] ont réussi à contrôler les mouvements en 2 dimensions d'un fauteuil roulant virtuel, avec une précision de 98.4%. Ils ont utilisé la combinaison des potentiels évoqués désynchronisés et synchronisés alors que les recherches ne se servaient que des potentiels désynchronisés jusqu'alors. Lors de leurs tests, le temps moyen pour atteindre une cible à 10 mètres est de 59 secondes.

[30] ont créé un robot semi-autonome nommé FRIEND II ; c'est en réalité un fauteuil roulant équipé d'une table, d'un bras robotique, d'un écran d'ordinateur et de multiples capteurs de vision. Le patient est équipé d'un dispositif de type EEG, mesurant les SSVEP, et doit sélectionner une tâche sur l'écran, comme se servir un verre. Le bras robotique entamera alors automatiquement l'action.

Concernant les prothèses, [31] ont réussi à développer une interface cerveau-machine non invasive capable de contrôler une main artificielle. Un patient tétraplégique a réussi, au terme d'un apprentissage de cinq mois, à ouvrir et fermer la prothèse en imaginant divers mouvements. Les récentes recherches de [32] ont permis de créer un exosquelette portable, connecté par un casque EEG sans fil, permettant d'assister les mouvements du bras.

D'autres applications pouvant aider les personnes atteintes de handicaps à gagner en indépendance ont vu le jour : [5] ont réussi à piloter un robot par l'intermédiaire de l'EEG, ce dernier peut alors marcher dans une direction donnée ou prendre des objets. L'utilisateur a le choix parmi quatre actions possibles et reçoit le feedback grâce aux caméras placées sur le robot. L'action peut être effectuée en moins de 5 secondes et le taux de réussite atteint 95%.

B. Communication

[22] ont été des pionniers en matière de communication par la pensée, en utilisant la composante P300. Pour cela ils représentent les 26 lettres de l'alphabet et plusieurs symboles sous la forme d'un clavier virtuel affiché sur un écran d'ordinateur.

Le sujet doit se concentrer sur la lettre ou le symbole qu'il souhaite utiliser et parallèlement les lignes et les colonnes du clavier sont flashées aléatoirement de manière à mettre en valeur une cellule à chaque flash. Si le flash intervient sur la lettre ou l'utilisateur se concentre, les électrodes de l'EEG pourront capter la composante P300. Les méthodes de classification permettent ensuite de déterminer la lettre cible. Les données issues de l'expérience montrent qu'en moyenne il est possible d'épeler 2.3 caractères par minute, cela reste très faible et ne permet pas d'établir une réelle conversation. En affinant cette technique, [33] ont montré qu'il est possible de monter jusqu'à 7.3 caractères par minutes avec un taux de réussite proche de 80%, toutefois ces tests ont été réalisés sur des individus en bonne santé.

D'autres auteurs comme [34] ont tentés d'implanter des microélectrodes dans le cortex cérébral afin de capter directement les signaux émis par les neurones impliqués dans la production du langage. L'idée étant de synthétiser artificiellement l'information récoltée en une sortie audio. De plus, de nombreuses autres études utilisant l'EEG montrent qu'il est possible d'obtenir une classification des mots ou des phonèmes grâce à l'activité neuronale liée à la production du langage [35]. Ces techniques permettent de libérer le champ de vision de l'individu car il n'a pas à se concentrer sur un clavier virtuel, lui laissant libre cours pour regarder son interlocuteur lors d'un échange [36].

Dans la même lignée, [37] se sont penchés sur la synthèse de parole *online* pour les patients LIS. Pour cela, ils se servent d'un modèle connexionniste de la production du langage, le modèle DIVA, afin de convertir en parole les signaux récoltés grâce à une électrode profonde placée dans le gyrus précentral gauche, une région impliquée dans la production de la parole. Leur méthode ne leur a pas non plus permis d'approcher le débit de parole d'une conversation classique, mais ils ont obtenu des résultats encourageants avec des sujets sains (et une EEG classique).

IV. Conclusion et perspectives

Les ICM, en assurant une communication directe entre notre esprit et une machine, sont un moyen nous permettant d'agir sur notre environnement en s'abstrayant des contraints de notre corps.

Cette communication est basée sur la détection et la classification de caractéristiques distinctives et invariantes de notre activité cérébrale, suite à une tâche donnée. L'association entre une classe d'activations et une action de la machine permettant de définir la ligne de base de l'ICM liant l'individu à cette machine.

La détection de ces caractéristiques peut se faire de manière permanente en arrière-plan (ICM passive), en réaction à un stimulus envoyé par la machine (ICM réactive) ou du plein gré de l'utilisateur, souhaitant provoquer un changement chez la machine (ICM active).

Les applications possibles à ce type d'interfaces homme-machine sont très nombreuses, vu qu'elles permettent à une machine d'avoir un accès direct et non-biaisé à nos réactions lors d'un échange.

Ce type d'interface est majoritairement utilisé dans le domaine médical afin de permettre à des patients ayant perdu l'usage d'une partie de leur corps, de retrouver une certaine autonomie en récupérant certaines possibilités d'action sur leur environnement. Se déplacer grâce à un fauteuil roulant commandé mentalement, saisir des objets grâce à des membres artificiels contrôlés comme s'il s'agissait de nos vrais membres, communiquer grâce a un synthétiseur vocal interprétant directement nos intentions de parole … les possibilités semblent infinies.

Cependant, de nombreux axes de recherche restent encore à explorer, notamment pour faire de ces applications de réelles interfaces entre le cerveau et la machine, en permettant à la machine de renvoyer des informations directement à notre cerveau. Par exemple, l'équipe ayant développé l'interface BrainGate (dont est équipée Jan Scheuermann) travaille sur un moyen de redonner aux patients quadriplégiques le sens du toucher (dans une certaine mesure) en reliant leur cortex sensoriel directement aux capteurs de pression du bras robotique.

En parallèle, un autre axe de recherche à investiguer serait celui de l'embodiement, soit la manière dont notre cerveau s'approprierait un système moteur et/ou perceptif artificiel auquel nous serions « connectés ». En effet, les études sur la *Rubber Hand Illusion* [38] ont dévoilées que même sans retour sensoriel, une main factice est rapidement (en une dizaine de secondes) perçue comme nous appartenant, générant des sensations fantômes lorsque celle-ci est touchée ou caressée.

Il serait donc primordial, dans ce contexte d'évolution rapide des BCI, de s'intéresser à la relation complexe qui existe entre la représentation cognitive de notre corps et l'intégrité de celui-ci, afin de mieux comprendre la manière dont notre cerveau s'approprierait une « extension » motrice ou perceptive, et quelles conséquences cette appropriation aurait sur notre cognition, qui est intimement liée à notre corps et ses capacités et limitations inhérentes.

REFERENCES

[1] C. Mühl, B. Allison, A. Nijholt, and G. Chanel, "A survey of affective brain computer interfaces: principles, state-of-the-art, and challenges," *Brain-Computer Interfaces*, vol. 1, no. 2, pp. 66–84, Apr. 2014.

[2] M. Congedo, M. Goyat, N. Tarrin, G. Ionescu, L. Varnet, B. Rivet, R. Phlypo, N. Jrad, M. Acquadro, and C. Jutten, "' Brain Invaders': a prototype of an open-source P300-based video game working with the OpenViBE platform," in *5th International Brain-Computer Interface Conference 2011 (BCI 2011)*, 2011, pp. 280–283.

[3] N. Kosmyna, F. Tarpin-Bernard, and B. Rivet, "Towards Brain Computer Interfaces for Recreational Activities: Piloting a Drone," in *Human-Computer Interaction – INTERACT 2015*, vol. 9296, J. Abascal, S. Barbosa, M. Fetter, T. Gross, P. Palanque, and M. Winckler, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 506–522.

[4] J. R. Wolpaw and D. J. McFarland, "Control of a two-dimensional movement signal by a noninvasive brain-computer interface in humans," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 101, no. 51, pp. 17849–17854, 2004.

[5] C. J. Bell, P. Shenoy, R. Chalodhorn, and R. P. N. Rao, "Control of a humanoid robot by a noninvasive brain–computer interface in humans," *Journal of Neural Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 214–220, Jun. 2008.

[6] N. I. Sabra and M. Abdel Wahed, "The use of MEG-based brain computer interface for classification of wrist movements in four different directions," 2011, pp. 1–7.

[7] O. Cohen, S. Druon, S. Lengagne, A. Mendelsohn, R. Malach, A. Kheddar, and D. Friedman, "fMRI robotic embodiment: A pilot study," 2012, pp. 314–319.

[8] J. Millan and J. Mourino, "Asynchronous bci and local neural classifiers: an overview of the adaptive brain interface project," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 159–161, Jun. 2003.

[9] G. Pfurtscheller, C. Neuper, A. Schlögl, and K. Lugger, "Separability of EEG signals recorded during right and left motor imagery using adaptive autoregressive parameters," *Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 6, no. 3, pp. 316–325, 1998.

[10] E. Haselsteiner and G. Pfurtscheller, "Using time-dependent neural networks for EEG classification," *Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 4, pp. 457–463, 2000.

[11] S. J. Raudys and A. K. Jain, "Small sample size effects in statistical pattern recognition: recommendations for practitioners," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 13, no. 3, pp. 252–264, Mar. 1991.

[12] J. H. Friedman, "On bias, variance, 0/1—loss, and the curse-of-dimensionality," *Data mining and knowledge discovery*, vol. 1, no. 1, pp. 55–77, 1997.

[13] G. Chanel, C. Rebetez, M. Bétrancourt, and T. Pun, "Emotion Assessment From Physiological Signals for Adaptation of Game Difficulty," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, vol. 41, no. 6, pp. 1052–1063, Nov. 2011.

[14] B. Reuderink, C. Mühl, and M. Poel, "Valence, arousal and dominance in the EEG during game play," *International Journal of Autonomous and Adaptive Communications Systems*, vol. 6, no. 1, p. 45, 2013.

[15] B. Z. Allison and J. Polich, "Workload assessment of computer gaming using a single-stimulus event-related potential paradigm," *Biological Psychology*, vol. 77, no. 3, pp. 277–283, Mar. 2008.

[16] A. Buttfield, P. W. Ferrez, and J. del R. Millán, "Towards a robust BCI: error potentials and online learning," *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, vol. 14, no. 2, pp. 164–168, Jun. 2006.

[17] V. Abootalebi, M. H. Moradi, and M. A. Khalilzadeh, "A new approach for EEG feature extraction in P300-based lie detection," *Comput Methods Programs Biomed*, vol. 94, no. 1, pp. 48–57, Apr. 2009.

[18] S. Koelstra, C. Muhl, M. Soleymani, Jong-Seok Lee, A. Yazdani, T. Ebrahimi, T. Pun, A. Nijholt, and I. Patras, "DEAP: A Database for Emotion Analysis ;Using Physiological Signals," *IEEE Transactions on Affective Computing*, vol. 3, no. 1, pp. 18–31, Jan. 2012.

[19] G. Liberati, R. Veit, S. Kim, N. Birbaumer, C. von Arnim, A. Jenner, D. Lule, A. C. Ludolph, A. Raffone, M. O. Belardinelli, J. D. da Rocha, and R. Sitaram, "Development of a Binary fMRI-BCI for Alzheimer Patients: A Semantic Conditioning Paradigm Using Affective Unconditioned Stimuli," 2013, pp. 838–842.

[20] D. C. Hammond, "Neurofeedback Treatment of Depression and Anxiety," *Journal of Adult Development*, vol. 12, no. 2–3, pp. 131–137, Aug. 2005.

[21] M. Arns, S. de Ridder, U. Strehl, M. Breteler, and A. Coenen, "Efficacy of neurofeedback treatment in ADHD: the effects on inattention, impulsivity and hyperactivity: a meta-analysis," *Clin EEG Neurosci*, vol. 40, no. 3, pp. 180–189, Jul. 2009.

[22] L. A. Farwell and E. Donchin, "Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials," *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, vol. 70, no. 6, pp. 510–523, Dec. 1988.

[23] G. R. Müller-Putz, R. Scherer, C. Brauneis, and G. Pfurtscheller, "Steady-state visual evoked potential (SSVEP)-based communication: impact of harmonic frequency components," *Journal of Neural Engineering*, vol. 2, no. 4, pp. 123–130, Dec. 2005.

[24] F. Beverina, G. Palmas, S. Silvoni, F. Piccione, and S. Giove, "User adaptive BCIs: SSVEP and P300 based interfaces." *PsychNology Journal*, vol. 1, no. 4, pp. 331–354, 2003.

[25] B. Wodlinger, J. E. Downey, E. C. Tyler-Kabara, A. B. Schwartz, M. L. Boninger, and J. L. Collinger, "Ten-dimensional anthropomorphic arm control in a human brain−machine interface: difficulties, solutions, and limitations," *Journal of Neural Engineering*, vol. 12, no. 1, p. 016011, Feb. 2015.

[26] B. Rebsamen, C. Guan, H. Zhang, C. Wang, C. Teo, M. H. Ang, and E. Burdet, "A brain controlled wheelchair to navigate in familiar environments," *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, vol. 18, no. 6, pp. 590–598, Dec. 2010.

[27] G. Pires, M. Castelo-Branco, and U. Nunes, "Visual P300-based BCI to steer a wheelchair: a Bayesian approach," in *Engineering in Medicine and Biology Society, 2008. EMBS 2008. 30th Annual International Conference of the IEEE*, 2008, pp. 658–661.

[28] G. Pfurtscheller, C. Neuper, D. Flotzinger, and M. Pregenzer, “EEG-based discrimination between imagination of right and left hand movement,” *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, vol. 103, no. 6, pp. 642–651, Dec. 1997.

[29] D. Huang, K. Qian, D.-Y. Fei, W. Jia, X. Chen, and O. Bai, “Electroencephalography (EEG)-based brain-computer interface (BCI): a 2-D virtual wheelchair control based on event-related desynchronization/synchronization and state control,” *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, vol. 20, no. 3, pp. 379–388, May 2012.

[30] D. Valbuena, M. Cyriacks, O. Friman, I. Volosyak, and A. Graser, “Brain-Computer Interface for high-level control of rehabilitation robotic systems,” 2007, pp. 619–625.

[31] C. Guger, W. Harkam, C. Hertnaes, and G. Pfurtscheller, “Prosthetic control by an EEG-based brain-computer interface (BCI),” in *Proc. aaate 5th european conference for the advancement of assistive technology*, 1999, pp. 3–6.

[32] Z. G. Xiao, A. M. Elnady, J. Webb, and C. Menon, “Towards a brain computer interface driven exoskeleton for upper extremity rehabilitation,” 2014, pp. 432–437.

[33] E. Donchin, K. M. Spencer, and R. Wijesinghe, “The mental prosthesis: assessing the speed of a P300-based brain-computer interface,” *Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 2, pp. 174–179, 2000.

[34] J. S. Brumberg, A. Nieto-Castanon, P. R. Kennedy, and F. H. Guenther, “Brain–computer interfaces for speech communication,” *Speech Communication*, vol. 52, no. 4, pp. 367–379, Apr. 2010.

[35] C. S. DaSalla, H. Kambara, M. Sato, and Y. Koike, “Single-trial classification of vowel speech imagery using common spatial patterns,” *Neural Networks*, vol. 22, no. 9, pp. 1334–1339, Nov. 2009.

[36] J. S. Brumberg, F. H. Guenther, and P. R. Kennedy, “An Auditory Output Brain–Computer Interface for Speech Communication,” in *Brain-Computer Interface Research*, C. Guger, B. Z. Allison, and G. Edlinger, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 7–14.

[37] F. H. Guenther and J. S. Brumberg, “Brain-machine interfaces for real-time speech synthesis,” 2011, pp. 5360–5363.

[38] G. L. Moseley, A. Gallace, and C. Spence, “Bodily illusions in health and disease: Physiological and clinical perspectives and the concept of a cortical ‘body matrix,’” *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, vol. 36, no. 1, pp. 34–46, Jan. 2012.

Robotique industrielle

Jean Tornier
M2R Sciences Cognitives
Grenoble INP - Phelma
Grenoble, France
Jean.Tornier@phelma.grenoble-inp.fr

Guillaume Leroy
M2R Sciences Cognitives
Grenoble INP - Phelma
Grenoble, France
Guillaume.Leroy@phelma.grenoble-inp.fr

***Abstract*—Ce document est une courte revue concernant la robotique industrielle. Il reprend tout d'abord une introduction concernant la robotique industrielle et les contraintes dans ce domaine, notamment dans l'industrie automobile, mais également à travers un exemple concret : STMicroElectronics. Il évoque par la suite l'avancé, dans ce domaine, qu'est Baxter, ces différentes spécificités et sa façon de respecter les contraintes énoncés plus tôt. Enfin, une explication et évaluation du problème de « motion safety » est effectuée.**

I. Introduction

La robotique industrielle est dans notre société une science de plus en plus utilisée. Les robots sont capables d'effectuer des opérations humaines de substitution telles que la soudure ou l'assemblage de pièces entre elles.

Nous allons tout d'abord nous intéresser aux robots utilisés jusqu'ici, notamment les robots de l'industrie automobile ainsi que les robots de transport chez STMicroelectronics.

A. Les robots de production de l'industrie automobile

La robotique est très utilisée dans le secteur de l'automobile. Les robots mis en œuvre dans ce secteur d'activité sont généralement des robots sous forme de bras articulés. L'un des avantages de l'utilisation de pareils robots est leurs taux de production plus élevé que celui d'un salarié : l'activité de production remplie par le robot est très souvent répétitive et ne nécessite pas de réfléchir sur des problèmes aléatoires.

Cependant, beaucoup d'entreprises sont réticentes à faire l'acquisition d'un robot en raison de leur prix élevé ainsi que des risques que cela peut entraîner.

Si Henry Ford installa la production à la chaine dans ses usines au début du 20ième siècle, au 21ième siècle les ouvriers sont de plus en plus remplacés par des robots mécaniques.

On catégorise les différents robots de l'industrie en fonction de leurs tâches :

1. La première catégorie regroupe les robots de soudure et de peinture. Ces robots sont très utilisés dans le milieu de l'automobile.

2. La seconde catégorie regroupe les robots d'assemblages.

3. La troisième regroupe les robots de type utilitaires tels que des robots de transport, d'inspection (de dimension d'une pièce par exemple) ou encore des robots d'inspection de zone impossible à inspecter par un être humain (à cause du degré de dangerosité).

Une illustration de l'utilisation de ces robots peut être faite avec les robots KUKA : ces robots sont vendus par l'entreprise KUKA à des concessionnaires automobiles pour gérer des chaines de montages.

Les robots KUKA sont généralement amenés à effectuer des opérations de soudures telles que faire 3 900 points de soudures sur 290 pièces différentes ou encore des opérations d'assemblage telles que souder deux pièces ensemble sur 28 points de soudure en 60 secondes (ce qu'un être humain ne peut physiquement pas faire). Les contraintes supportées par ces robots sont donc :

- Des contraintes de 'performance' : quasiment retrouvées chez tous les types de robots, ces contraintes sont particulièrement importantes dans le domaine de l'automobile. Les robots doivent effectuer un travail le plus rapidement possible sans pour autant sacrifier la rapidité du traitement au dépend de la qualité qui doit être maximale lors de la création d'une voiture (politique du ZERO défaut).

- Des contraintes de 'sécurité' : ces robots doivent être munis de système d'arrêt d'urgence dans le cas où une situation anormale nécessitant l'arrêt de la production arriverait. Cependant, ces robots de l'industrie automobile fonctionnent dans un environnement interdit aux humains non autorisés. Les contacts de ces robots avec un être humain se

fait souvent dans le cadre d'une intervention de maintenance planifiée mais jamais dans le cadre de la production de façon spontanée.

Vous trouverez en annexe 1 une image d'une chaine d'assemblage utilisant des robots et illustrant les contraintes de fonctionnement vues ci-dessus.

B. *Les robots d'aide à la production chez STMicroElectronics (ST)*

ST est une entreprise de production de semi-conducteurs (SC) franco-italienne. Les SCs sont produit dans un environnement extrêmement contraint : une salle blanche.

Ces SCs sont fabriqués à partir de plaques de silicum appelés *wafers* qui sont regroupées dans une boite en plastique appelée *foup* (cf. annexe 2). La production d'un foup nécessite son passage à travers différents ateliers dans la salle blanche ce qui implique de transporter les foups d'un atelier à un autre.

ST utilise des robots de transports différents selon les deux usines de fabrication :

- L'usine "200 mm" (production des SCs sur des wafers de 200 mm de diamètre) exploite des robots roulant à même le sol.

- L'usine "300 mm" (production des SCs sur des wafers de 300 mm de diamètre) exploite des robots roulant sur des rails fixés au plafond.

Deux images de ces deux robots sont présentées en annexe 3 de l'article. Ces deux types robots doivent répondre à des contraintes communes telles que :

- La contrainte de 'performance' : le robot doit être capable d'effectuer un transport de foup d'un atelier A à un atelier B dans un temps minimal et ce en respectant des règles de transport internes à l'entreprise (suivi d'un balisage, asservissement de position, normes, …).

- La contrainte de 'sécurité' : le robot doit évoluer de façon sécurisée vis-à-vis des opérateurs humains travaillant en salle blanche (évitement de la collision, système de saisie et de maintien du foup fiable, gestion de la vitesse de déplacement, …).

- La contrainte 'd'intégration' : le robot doit être capable d'évoluer dans un environnement où il n'est pas seul. D'autres robots existent et peuvent être utilisés simultanément. Le robot ne doit pas faire le travail d'autres robots et doit être capable de s'intégrer dans le réseau (évitement de la collision inter-robots par exemple).

- La contrainte 'd'utilisation' : le robot doit être utilisable par l'intégralité des opérateurs humains. Cela passe par une bonne gestion des interfaces homme-machine.

A la différence des robots de production automobile présentés dans la section A précédente, ces robots sont différents de par leurs utilisations.

Ils évoluent dans un environnement où le facteur humain est omniprésent et impossible à supprimer ou à contrôler. Il est impossible de supprimer les opérateurs en salle blanche étant donné qu'ils sont la force de production de l'entreprise (ils pilotent les équipements de production). Il est également impossible de contraindre les déplacements des opérateurs (une intervention sur un équipement doit se faire, pour des raisons pratiques, en totale liberté). Ainsi, la priorité du robot est toujours secondaire vis-à-vis du facteur humain au niveau du déplacement.

Cependant, ces robots évoluent sans interagir directement avec les opérateurs. Une fois une requête de déplacement d'un foup effectuée par l'opérateur, le robot n'interagit pas avec l'Homme et évolue dans son environnement de façon autonome (déplacement du foup de la zone de préhension vers la zone de réception/dépôt du foup).

Ces robots sont d'avantages similaires à des automates dont les actions sont clairement définies et programmées préalablement à leurs mises en production. La présentation d'une situation, non prévue par leurs programmes, ne fera pas l'objet d'une analyse de la part du robot dans l'optique de la résoudre.

L'avenir dans les environnements de production se trouve dans les interactions que les employés d'une entreprise peuvent avoir à effectuer avec le robot de production.

Selon les types de robots présentés précédemment (automobile et ST), aucune interaction dynamique humaine (interaction dans le cadre du fonctionnement du robot) n'est possible.

Nous voyons apparaitre ces derniers temps des robots plus intelligent et plus ouvert à la communication Homme-machine tel que le robot Baxter.

II. Un robot industriel nouvelle generation : Baxter

Baxter est un robot industriel développé par Rethink Robotics, l'entreprise fondée et dirigée par Rodney Brooks. Ancien directeur du laboratoire d'intelligence artificielle au MIT, il a également été chercheur pour les universités de Carnegie Melon et du MIT avant de fonder cette entreprise en 2008. A partir de ce moment, Brooks et son équipe s'engagent dans un projet qui durera environ 5 ans, durant lequel aucune information ne sera donnée afin de garder le plus grand

mystère. C'est ainsi que Baxter, se présentant comme une révolution du monde de la manufacture, verra le jour en 2013.

A. Limites et problèmes rencontrés

Afin de pouvoir comprendre en quoi Baxter est une avancée dans le monde de la robotique industrielle, il est important de passer en revue les différents problèmes pouvant être rencontrés dans ce domaine et en quoi Baxter résout ces problèmes.

Comme expliqué en I.B, la contrainte d'intégration est importante pour la bonne évolution du robot à l'intérieur de l'entreprise. Chez Baxter, cette contrainte est respectée de plusieurs façons.

Tout d'abord, il dispose d'une technologie visuelle intégrée au niveau de ces poignets et de sa tête. Grâce à cela, il dispose d'un système de positionnement qui lui permet de s'adapter à l'environnement, plutôt que l'inverse. De plus, son socle mobile lui permet d'être déployé n'importe où dans l'entreprise, à n'importe quel moment. A cela s'ajoute sa facilité d'utilisation pour tous les utilisateurs. En effet, n'importe quel employé peut lui apprendre une tâche en moins de quelques minutes, simplement par démonstration. Ces trois caractéristiques nous prouvent que Baxter est probablement le robot dont l'intégration dans une entreprise est la plus facile.

Hors, les créateurs du petit robot ne se sont pas arrêtés là. En effet, tout ce que nous avons cité plus haut facilite l'intégration dans l'entreprise, mais uniquement d'un point de vue de la production.

De nos jours, la plupart des gens ont une peur injustifiée de la robotique. Ainsi, il n'est pas toujours évident d'intégrer un compagnon technologique au milieu d'une horde d'êtres humains. Ici, Rethink Robotics ont trouvé une nouvelle solution : rendre Baxter facilement appréciable et le faire ressembler, au moins un peu de par sa forme, à un être humain. Le but étant donc de le faire se fondre dans le décors comme si de rien n'était, comme expliqué dans [4] : « the vision was a two-armed robot and a head, because Rod had envisioned something that can go in and sit next to a person on the assembly line and help them out ».

Baxter se présente donc sous la forme d'un robot disposant de deux bras, un corps et une tête, composée d'un écran affichant deux yeux. Ces deux yeux lui permettent d'indiquer où son attention se concentre, ce qui permet à l'être humain travaillant avec lui de ne pas être surpris par un geste inattendu, mais ils lui permettent également d'afficher son état. Cette dernière fonctionnalité est en fait plutôt ingénieuse, puisque cela permet sa personnification, en comparant son état, qui n'est à la base qu'une fonction technologique, aux émotions humaines pouvant être exprimées avec les yeux. Ces spécificités facilitent donc largement l'intégration de Baxter dans une entreprise.

L'une des questions que nous pouvons nous poser se porte sur la performance d'un tel type de robot, dont l'apprentissage par imitation n'est en sois pas un indicateur de performance très élevées.

Bien qu'en effet, contrairement aux robots utilisés en entreprise automobile, où à ST, Baxter ne sera pas dans la capacité de déplacer des objets d'un bout à l'autre de l'usine, ou d'effectuer une tâche très rapide ni très précise, cela ne diminue pas pour autant sa performance. Les entreprises ont tendance à juger la performance d'une machine sur sa vitesse de travail et sa précision. Hors cette vision n'est pas forcément la meilleure. En effet, même si Baxter ne sera pas très rapide dans l'exécution de ces tâches, ses caractéristiques de mobilité et de facilité de programmation suffisent déjà à en faire un robot extrêmement performant.

A cela vient s'ajouter sa capacité d'adaptation à l'environnement. Les caméras positionnées sur ses poignets et sa tête vont, comme expliquer précédemment, lui servir de système de positionnement. Cela implique que n'importe quel objet dans un champ d'action pourra être traité. Il ne s'agit pas ici de traitement d'extrême précision comme un robot automobile, où les pièces doivent être toutes correctement alignées et où chaque robot ne peut s'occuper que d'un type de pièce. Baxter va au-delà de cela, puisqu'il sera donc capable de gérer n'importe quel objet, de n'importe quelle forme, dans son champ de traitement, du moment que son utilisateur lui ait appris auparavant. Enfin, le but premier de Baxter n'est pas sa propre performance, mais d'aider à améliorer la performance des employés – [4].

Bien que parfaitement intégré et très performant, tout cela n'a d'importance que si l'investissement finit par être rentable à un certain moment. Bien sûr, n'importe qui pourrait penser le genre de robot qu'est Baxter doit coûter une certaine somme à ses propriétaires, tant au moment de l'achat, que pour la maintenance physique et informatique. Ce qui au final n'en ferait pas un investissement si rentable. Pourtant, tout cela s'avère être faux.

En effet, lors de sa création, Rethink Robotics avait anticipé ce genre de problème. Pour y remédier, leur petit robot a été construit à partir de matériaux peu chers sans pour autant compromettre la qualité de ceux-ci. Ceci fut réalisé en achetant la plupart des parties dont ils avaient besoin à des manufacturiers locaux. Les petites économies ce sont donc empilées, et le prix final du robot a fini par diminuer grandement. Nous pouvons maintenant acheter Baxter pour la modique somme d'environ 22 000$, au lieu de plusieurs centaine de milliers pour un robot traditionnel comprenant des senseurs, deux bras et des programmes de qualité.

A tout cela s'ajoute une petite touche bien spéciale puisque Baxter est composé à 75% de parties récupérées aux USA et peut donc être distribué en tant que « Made in USA ». Rethink Robotics étant une entreprise américaine, et destinée à vendre son robot principalement dans les petites et moyennes entreprises manufacturières américaine, cette petite touche n'est pas négligeable.

Enfin, la dernière contrainte dont nous n'avons pas encore parlé se trouve être la plus importante de toute : la contrainte de sécurité. En effet, un robot ne peut être placé en milieu humain s'il n'est pas capable d'évoluer de façon sécurisée vis-à-vis des opérateurs. C'est pour cela, par exemple, que la plupart des machines utilisées dans l'industrie de l'automobile se retrouvent bien souvent dans des milieux privés d'interaction avec l'homme, mis à part pour leur maintenance où elles seront désactivées. Mais encore une fois, Rethink Robotics ont trouvé la solution.

Nous avons parlé précédemment des performances de Baxter, en citant le fait qu'il ne pourra effectuer des tâches très rapides. Cela joue en fait en sa faveur lorsqu'il s'agit de sécurité. En effet, avec une vitesse limitée, les risques de collision avec un travailleur humain ne sont que très faibles. Cependant, « très faibles » ne suffit pas lorsqu'il s'agit de la vie d'une personne. S'il y a 99% de chances qu'une collision ne se produise pas, il reste tout de même 1% de risque qu'elle se produise. Or, dans l'éventualité où cela se produirait, il n'y aurait tout de même rien à craindre dans le cas de Baxter.

En effet, son design joue non seulement en sa faveur en ce qui concerne son intégration dans l'entreprise, mais également lorsque l'on parle de contraintes de sécurité. Sa faible vitesse combinée à sa taille approximativement humaine et son poids d'environ 75kg font que, même dans l'éventualité où une collision arrivait, cela ne serait pas dangereux pour l'homme. Dans [4], Rodney Brooks en fait même une blague légère en disant : « I'll just walk in and have this thing bash into my head, and it's fine ».

Pourtant, bien que Rethink Robotics ait résolu le problème de sécurité assez facilement et de façon assez ingénieuse, celui-ci n'en reste pas moins l'un des problèmes les plus importants de la robotique industrielle. Certaines personnes y consacrent des études entières afin de pouvoir le résoudre.

B. Le problème de "motion safety"

Le problème de « motion safety » est quelque chose de critique pour n'importe quelle machine évoluant dans un environnement où il y a présence humaine, ou parfois présence d'autres machines. Dans son artcile [5], Thierry Fraichard se propose de définir trois critères de sureté à respecter.

Le premier critère de sécurité évoqué dans [5] cible les décisions de mouvement du robot. Il est expliqué que lorsqu'une machine automatisée prévoit ses mouvements, il devra tout le temps prendre en compte sa propre dynamique afin d'éviter toute collision avec un objet fixe. C'est-à-dire, lorsqu'un robot A entre en mouvements, afin de ne pas entrer en collision avec un objet B, il devra tout d'abord ne jamais planifier d'entrer dans l'espace occuper par B. Pour cela, s'il se rapproche trop de cet espace, il devra stopper son mouvement, et cela assez rapidement, en prenant en compte sa vitesse d'arrêt compte tenu de sa vitesse de mouvement. Cependant, ceci n'est pas valable que pour un objet fixe de l'environnement. Que se passerait-il si cet objet venait à être en mouvement ?

Le deuxième critère de sécurité concerne la prédiction de l'environnement. Pour être sécurisé, un robot devrait prendre en compte les possibles mouvements des objets de son environnement.

Reprenons notre robot A et notre objet B utilisés précédemment. Cette fois l'objet B est en mouvement, de même pour A. Dans ce cas, le deuxième critère prend la forme de A éviter l'objet B qui lui aussi est en mouvement. Si jamais ses décisions de mouvement ne prenait pas en compte la façon dont B se déplace, une collision ne serait pas certaine, mais elle n'en resterait pas moins probable. Le but étant d'éviter tout risque, A aura donc besoin de planifier les mouvements possible de B, afin de possiblement modifier les siens. Cependant, cela n'est toujours pas suffisant pour éviter la collision. En effet, si A n'évalue la positon de B que sur une courte période de temps, il pourrait en déduire une position sûre à un certain moment, mais qui en fait se trouverait être une position où la collision reste probable.

Nous en venons donc à notre troisième critère de sécurité : « pour décider de ses mouvement futurs, un système robotique devrait raisonner au-delà d'un horizon de temps infini » - [5].

Dans notre exemple avec A et B, cela se traduit de la manière suivante. Comme expliqué ci-dessus, si A décide de changer sa trajectoire en ne prenant en compte les mouvements de B que sur une période de temps restreinte, il pourrait tout de même entrer en collision avec. Pour résoudre cela, A doit évaluer la position de B sur tout son temps de mouvement, et non jusqu'à un temps restreint t où il trouvera un nouveau mouvement considéré comme sûr, mais qui ne le sera peut-être pas au temps t+1.

En 2007, S. Petti et T. Fraichard proposent une implémentation d'un planificateur de mouvements partiels afin d'essayer de résoudre le problème de « motion safety ». Ici, nous ne parlerons pas de l'implémentation en elle-même, mais du pourquoi d'une telle implémentation.

Dans [6], S. Petti et T. Fraichard nous présentent les problèmes inhérents à la planification de mouvements d'un système dynamique évoluant dans un environnement dynamique. Pour pouvoir éviter tout problème de collisions, le système se doit de prendre des décisions concernant ses mouvements, et cela en un temps limité. Or, selon eux, dans ces situations, une trajectoire complète jusqu'à la destination voulue n'est pas possible à calculer en un temps limité. Le système se retrouve donc avec une trajectoire partielle, dont la destination finale pourrait en fait se présenter comme une collision avec un objet, puisque le système n'aura pas eu le temps d'évaluer toutes les possibilités durant ce temps limité de calcul. Voilà pourquoi ces deux auteurs ont choisi de développer une implémentation d'un planificateur de mouvements partiels, qui correspond en fait à une itération de

planification du mouvement à un moment donné, prenant en input un model prédit de l'environnement futur.

Il faut savoir que de nos jours, la plupart des systèmes robotisés ne respectent pas tous les critères de sécurités que nous avons cités plus haut. Les raisons peuvent être diverses, mais prenons l'exemple des véhicules autonomes.

La plupart de ces véhicules vont en fait bouger selon un chemin déjà prédéterminé, où rien ni personne ne devrait se trouver. Pourtant il y a parfois un risque qu'une personne ou un objet se trouve sur la trajectoire. Pour ce genre de situation, le véhicule est équipé d'un système de détection qui analyse l'environnement devant lui. En cas de détection d'un objet ou d'une personne, il enclenche alors une manœuvre d'arrêt en prenant en compte ses propres dynamiques, mais pas celle de l'objet – [5]. Une collision devient alors probable, et nous retrouvons l'importance des critères de sécurité évoqués précédemment.

III. Conclusion

Le monde industriel est en train de subir une évolution notable. Depuis la révolution industrielle du 19ième durant laquelle l'Homme découvre une capacité de production non plus traditionnelle mais industrielle (production de masse), la robotique s'est cantonnée à des objectifs de production tel que la vitesse d'exécution d'une tâche répétitive. Cependant, avec les nouvelles avancées dans le domaine des communications Homme-Machine ainsi que sur l'augmentation de la puissance des équipements informatiques, de nouveaux robots font leurs apparitions. Leurs objectifs ne sont plus exclusivement liés à la production mais maintenant également liés à l'intégration du robot ainsi qu'à sa capacité de communication et de travail avec l'Homme. Baxter fait partie de ces robots : il est capable de contrôler ses mouvements dans un environnement humain.

La notion de « motion safety » est un aspect que les chercheurs de ce domaine essayent de plus en plus d'appliquer, afin qu'à terme, l'évolution de robots de tout type et toutes formes puisse se faire même en milieu humain. Ceci n'est pour le moment pas le cas, et le peu de robots introduits dans les industries sont extrêmement restreint. Cependant des avancées se font actuellement dans le domaine de l'automobile avec des voitures automatisées. Ces voitures n'ont pas besoin de conducteur et peuvent circuler en agglomération. Ceci n'est pas encore sur le marché mais nous pouvons espérer des grandes choses de ce genre de technologie qui pourrait par la suite se répandre dans d'autres domaines où la coexistence homme-machine est présente, notamment dans le monde de la robotique industrielle.

En ce qui concerne Baxter, la contrainte d'intégration étant parfaitement acquise, sa prochaine évolution technologique pourrait-elle être sa capacité à apprendre des tâches ? Jusqu'ici les robots se programmaient par intervention d'un programmateur humain et il est déjà possible d'apprendre à Baxter une procédure de saisie de pièce simplement en guidant son bras mécanique. Si cette capacité d'apprentissage pouvait s'étendre à des notions plus complexes et plus abstraites, Baxter franchirait peut être un pas de plus vers le robot humanoïde indépendant de l'Homme.

References

[1] http://www.kuka-robotics.com/fr/solutions/solutions_search/L_R142_Body_shop_Mercedes_Benz_A_Class.htm (consultée le 16/01/2016)

[2] http://www.kuka-robotics.com/fr/solutions/branches/automotive/start.htm (consulté le 16/01/2016)

[3] http://www.usinenouvelle.com/expo/guides-d-achat/robotique-industrielle-6 (consultée le 16/01/2016)

[4] E. Ackerman, E. Guizzo. « How Rethink Robotics Built Its New Baxter Robot Worker », [En ligne]. http://spectrum.ieee.org/robotics/industrial-robots/rethink-robotics-baxter-robot-factory-worker (consulté le 16/01/2016)

[5] T. Fraichard. « A Short Paper About Motion Safety ». IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Apr 2007, Rome (IT), 2007. < inria – 00134467 >

[6] T. Fraichard, S. Petti. « Safe Motion Planning in Dynamic Environments ». Proc. of the IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Aug 2005, Edmonton, AB (CA), France. 2005. < inria – 00182046 >

[7] http://www.rethinkrobotics.com/baxter/ (consulté le 16/01/2016)

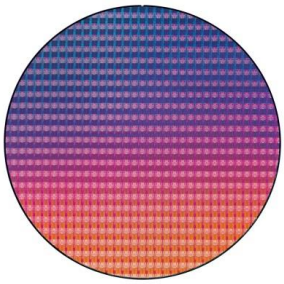
Remarque: les liens [1] et [2] présentent des robots industriels produits et vendus par l'entreprise KUKA animé par un objectif commercial. Les informations sont donc à lire avec un point de vue critique.

Annexe 1

Sur la figure ci-dessus se trouve une image d'une chaine d'assemblage dans le secteur de l'automobile chinois (le nom du fabricant n'étant pas connu). On remarque clairement que les robots effectuent leurs tâches de manière indépendante de toute intervention humaine (la zone d'assemblage étant délimitée par une barrière jaune de part et autre de la ligne d'assemblage). L'entreprise automobile attend de ces robots un taux de production (ou d'assemblage) élevé et de qualité.

Annexe 2

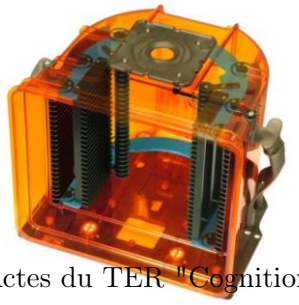
Cette annexe présente des informations complémentaires non reliés directement au sujet de l'article mais aidant à la compréhension de l'utilisation des robots de chez STMicroelectronics.



Plaque de silicum ou wafer :

Les SCs sont produits par une superposition de couche de métal.

Au maximum, il peut y avoir 10 déposes de métal (10 couches) ce qui implique 10 cycles de dépôt de métal (chaque cycle étant composé par N passages de N ateliers).



Foup :

Au maximum, 25 wafers peuvent être stockés dans un foup. Ces foups sont hermétiquement fermés afin d'éviter qu'une particule de poussière ne viennent endommager les puces présentes sur les wafers à l'intérieur du foup.

Ces foups sont par conséquent à manipuler avec précaution.

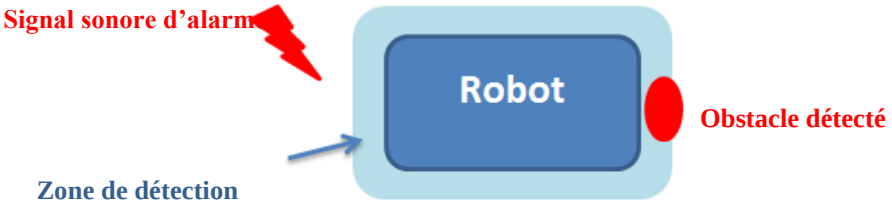
Annexe 3

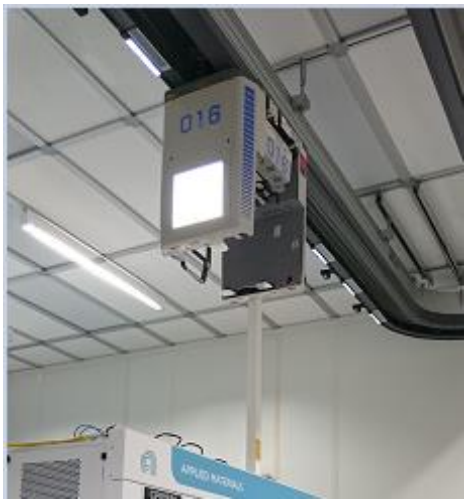
Robot de 200 mm :

Ces robots évoluent à même le sol. Ils transportent les foups (un maximum de 4 foups) en suivant un balisage au sol représenté par des lignes blanches.

Le fait d'évoluer sur le sol, le robot peut se trouver en contact physique avec des opérateurs humains. Afin d'éviter une éventuelle collision, le robot est pourvu de capteurs de présence tout autour de lui.

Ces capteurs définissent une zone autour du robot dans laquelle l'insertion d'un objet ou d'un Homme provoque l'arrêt du robot ainsi que l'émission d'un signal sonore d'alarme et ce jusqu'à ce que l'obstacle ait disparu.





Robot de 300 mm :

Ces robots évoluent au plafond de la salle blanche. Ils sont équipés d'un chariot qui descend afin de saisir le haut des foups. Une fois le foup remonté, le chariot verrouille le foup dans le robot.

Ce type de robot présente l'avantage de ne pas être en contact direct avec l'Homme. Ses seules situations où le facteur humain intervient sont les situations de saisi d'un foup ainsi que le dépôt d'un foup une fois le transport terminé.

INTRODUCTION À L' APPRENTISSAGE DÉVELOPPEMENTAL

Vila Gaël
INP Phelma - M2R Sciences Cognitives
Grenoble, France
gaelvila@msn.com

Guertin Léopold
INP Phelma - M2R Sciences Cognitives
Grenoble, France
leopold.guertin@gmail.com

2015-2016

***Résumé* - L'apprentissage développemental désigne le processus précoce, de nature essentiellement endogène, durant lequel le jeune enfant prend connaissance de son corps de son environnement, et des autres êtres intelligents. Il acquiert donc progressivement, mais très rapidement, des compétences nécessaires à sa future évolution dans la réalité. Les récentes avancées en robotique ont, pour leur part, également doté les automates modernes de capacités d'apprentissage. Ceux-ci atteignant en parallèle des niveaux de sophistication de plus en plus élevés (notamment en ce qui concerne les robots sociaux), il devient de plus en plus difficile de tirer profit de leurs nouvelles capacités par simple programmation d'usine. C'est ainsi que se développe la problématique d'un apprentissage développemental chez le robot : imiter les capacités innées d'apprentissage et d'intégration multimodale efficaces dont fait preuve l'être humain dès la naissance. Cet article introduit donc le jeune enfant comme source d'inspiration pour l'automate en quête de développement.**

Mots-clés - Apprentissage développemental, Jeune enfant, Stades de développement, Robot, Contrôle moteur, Apprentissage par renforcement.

INTRODUCTION

L'un des atouts les plus étonnants de l'être humain est sa capacité à se développer seul pour atteindre, à partir d'un minimum de connaissances a priori, la plus parfaite autonomie par simple interaction avec son environnement. Les animaux viennent au monde avec des instincts propres à leur espèce : la plupart des mammifères savent marcher dès la naissance, d'autres savent même déjà nager. Ces compétences précoces leur permettent de survivre dans la nature. La principale compétence de l'être humain est de savoir apprendre. Malgré la forte disparité des instincts natifs entre les différentes espèces (les connaissances du nourrisson ne lui permettent pas de survivre comme le ferait un jeune requin), tous les individus font preuve de fortes capacités d'apprentissage dès leur plus jeune âge, et ce dans le but d'acquérir des connaissances nécessaires à l'évolution dans leur environnement : c'est l'apprentissage développemental. Lorsqu'on l'active pour la première fois, un robot est comme un nouveau-né : il prend progressivement connaissance de ses capacités de perception et et d'action, à partir desquelles il devra dériver des comportements. Sur une telle toile vierge, il est impossible de programmer "génétiquement" toutes les actions et réactions que dont ce robot devra faire preuve pour mener à bien , dans un environnement réel, toutes les tâches pour lequel il a été conçu. C'est dans ce contexte l'apprentissage développemental en robotique prend tout son sens. Une intelligence artificielle pourrait-elle être capable d'apprendre comme le ferait un jeune enfant, et seule, de développer ses compétence de manière à devenir autonome ? Dans cet article, nous illustrerons d'abord la notion d'apprentissage développemental chez l'être humain : nous présenterons les différents niveaux d'acquisition de compétences au début de sa vie, et dans quels domaines nous pouvons constater des développements fulgurants. L'étude objectivée de l'être humain est essentiellement comportementale : les mécanismes précis qui permettent cet apprentissage nous sont encore peu connus, aussi seulement pouvons-nous en observer les conséquences sur le développement du petit enfant. À l'inverse, nous savons développé des techniques efficaces en apprentissage machine, fondées sur des théories scientifiques solides et bien établies. Mais si ces techniques donnent de très bons résultats pour des problèmes simples dans un environnement restreint, elles échouent presque toujours en conditions réelles. Une fusion de nos connaissances actuelles en théorie formelle de l'apprentissage, avec ce que l'on sait des comportements humains, pourrait permettre une modélisation efficace de nos capacités d'apprentissage. La seconde partie de cet article utilise l'exemple de l'apprentissage sensorimoteur

chez le robot, pour introduire l'apprentissage développemental en robotique : depuis le contrôle d'un simple mouvement via la théorie des systèmes dynamiques, jusqu'à l'acquisition de tâches complexes et du principe de motivation intrinsèque. A la frontière entre la programmation du jeune robot, et les instincts du jeune humain.

1 Niveaux d'apprentissage développemental chez l'humain

Il existe différents niveaux d'apprentissage développemental chez l'humain qui sont le développement cognitif, affectif, psycho-moteur. Pour faire le lien entre robot et humain nous allons nous intéresser plus particulièrement aux différents stades du développement cognitif ainsi qu'à la fonction auditive, le début de la parole et le début des intéractions sociales.

1.1 Les différents stades du développement cognitif

Le développement cognitif est le développement des facultés telles que voir, entendre, toucher, goûter et sentir ; mémoriser et apprendre ; comprendre le langage et prononcer des mots par la suite ; et également penser. Le premier a avoir évoqué le développement cognitif d'un individu sous forme de stades est Jean Piaget, selon ses travaux, ce développement est caractérisé par un ensemble de paliers d'acquisition. Ces paliers d'acquisition sont regroupés en stades qui suivent une hiérarchie. En effet, l'ordre est primordial, immuable d'un individu à l'autre et un stade repose sur les acquis du stade précédent ce qui fait qu'aucun stade ne peut être sauté.
Les différents stages sont :

- Stade sensori-moteur
- Stade préopératoire
- Stade opératoire concret
- Stade opératoire formel

Ces stades se déroulent pendant l'enfance. En effet, le premier stade commence à la naissance tandis que le dernier commence à partir de 12 ans environ.
Dans l'apprentissage des compétences sociales chez le robot, les comportements intelligents peuvent être construits sur les 3 premiers stades. [1]

1.1.1 Stade sensori-moteur

Entre 0 et 24 mois, c'est le stade de l'expérimentation et de l'action, l'enfant distingue différentes entités y compris lui-même et son environnement. Il commence à apprendre les fonctions de ses mains, ses pieds et ses yeux ce qui lui permet d'observer et manipuler des objets. Via ces manipulations et ces observations, l'enfant identifie les objets intéressants de l'environnement, ce qui lui permet de créer une représentation de l'objet. À ce stade il manipule seulement les objets visibles et ignore les objets absents de se vue. De plus les actions-reflexes vont devenir des actions intentionnelles par répétition. La figure 1 montre un exemple où l'enfant comprend les différentes fonctions de son corps dans le but de manipuler un livre.

FIGURE 1 – Exemple d'action dans le cadre du stage sensori-moteur. La figure provient de [1]

1.1.2 Stade préopératoire

Ce stade a lieu entre 24 mois et 6/7 ans, il apparaît avec le langage. À ce stade l'enfant distingue les objets en utilisant un seul attribut (couleur, texture, odeur...). Puis il regroupe les objets en fonction de leur similarité pour créer une représentation symbolique de l'objet. Ces représentations sont acquis et coordonnés dans la pensée sous forme d'image mentale.

1.1.3 Stade opératoire concret

Ce stade a lieu entre 6/7 ans et 11/12 ans. L'enfant classe les objets grâce à leurs différentes attributs mais aussi grâce à leurs structures. La représentation de l'objet devient plus précise, l'enfant est capable de garder le modèle de l'objet en tête sans représentation visuelle. [1] Il y également apparition d'opérations logiques de raisonnement portant sur des objets présents ou immédiatement représentables. Ces opérations logiques font partie du registre opératoire concret du fonctionnement intellectuel de l'adulte.

1.1.4 Stade opératoire formel

Ce stade a lieu à partir de 12 ans environ. Le raisonnement porte sur des propositions abstraites et non sur des actions en lien avec le réel. L'enfant est capable d'émettre des hypothèses, d'en tirer des conclusions, de gérer plusieurs variables.

1.2 Apprentissage au stade sensori-moteur : fonction auditive

1.2.1 Apprentissage des sons

La reconnaissance des sons commence dès le stade de la grossesse/in utero. L'enfant a la capacité de discriminer des sons provenant de la parole aux environs de 7 mois de gestation. Ceci fait que l'enfant naît avec une certaine expérience auditive de sa langue ambiante. [2]

1.2.2 Développement de la perception du langage

Une étude pionnière de 1971 montre que les enfants de 1 à 4 mois différencient quelques syllabes différentes (comme /ba/ et /pa/) et à 1 mois ils sont capables de perception catégorielle comme les adultes. De plus ces études montrent qu'il n'est pas nécessaire de produire des sons pour en reconnaitre. [3]

Au départ l'enfant a la capacité de percevoir des phonèmes de n'importe quelle langue, puis il ne perçoit plus que les phonèmes de sa langue maternelle. Ceci est appelé l'apprentissage apr sélection ou oubli. On peut noter plusieurs types de sélection :

— sélection par contraste de voyelle
— sélection par contraste de ton
— sélection par voisement
— sélection sur les lieux d'articulation
— sélection sur les classes de rythme

À la naissance les enfants sont spécialistes de la prosodie.

1.2.3 Reconnaissance des mots

Aux environs de 4/5 mois les enfants sont capables de reconnaitre leur prénom, puis, entre 6 et 8 mois, ils sont capables de segmenter le flux de parole en unité. Pour ce faire ils utilisent plusieurs indices à la fois pour segmenter le flux sonore continu en mots, ces indices sont :

— accent lexical et indices phonotactiques
— accent lexical et informations statistiques

1.2.4 L'accès au sens

À 11 mois les enfants reconnaissent des mots familiers même sans les comprendre. [4]Dès 14 mois les enfants peuvent faire l'association entre un objet et un mot avec lequel ils ont été familiarisés, même lorsqu'ils ne connaissent pas le mot.

1.3 Apprentissage au stade sensori-moteur : le début de la parole

Pour produire des sons de parole, des voyelles et des consonnes, l'enfant doit maîtriser et coordonner un appareil vocal complexe, des poumons aux lèvres en passant par le larynx, le velum et la langue. Nous donnerons les étapes de la première année dans le tableau ci-dessous :

1-2 mois	phonation continue sans articulation "aaa ?" phonation intonée ininterrompue
2-3 mois	phonation interrompue = phonation rythmée =suite d'interruptions du voisement [a ?a ?a ?]
3-5 mois	phonation + une articulation supra glottique [aRe] =constriction pharyngale ou labiale [awu]
5-7 mois	variantes phonatoires avec ou sans articulation = qualités de voix différentes : voix rauque, chuchotée, etc.
7-8 mois	rythmes supraglottiques = babillage canonique ex : [bababa, dadada, mamama]
8-10 mois	babillage varié : chgt de consonne ou voyelle ex : [badi]
12-13 mois	babillage + premières lexies ex :« mama »,« papa »

Ces étapes résument l'évolution de la parole pendant la première année qui se manifeste par le babillage. Les productions du babillage sont déjà colorées par la langue ambiante, les productions des bébés ne sont donc pas uniquement façonnées par des contraintes universelles biomécaniques.

1.4 Le début des intéractions sociales

Les intéractions sont étroitement liées au développement du langage lors du stade sensori-moteur.

En effet, entre 6 et 9 mois l'enfant commence par regarder d'où provient le son, c'est ce qu'on appelle le pointage oculaire. Puis, entre 9 et 12 mois apparaît le geste de pointage qui il apparaît en général 2 mois avant l'apparition des premiers mots, l'enfant montre du doigt dans un but impératif ou déclaratif. C'est une étape majeure de la communication chez l'enfant.

2 APPRENTISSAGE DÉVELOPPEMENTAL CHEZ LE ROBOT

La robotique possède, pour sa part, beaucoup à offrir aux sciences du comportement et du développement cognitif. Elle s'intéresse en effet aux questions fondamentales que pose la nécessité d'aboutir à un fonctionnement autonome, à partir d'un minimum de connaissances a priori. Ainsi, si les sciences cognitives des compétences précoces constituent une source d'inspiration de plus en plus prospère pour l'intelligence artificielle, cette dernière permet en retour l'implémentation de modèles spécifiques au développement. Elle pose ainsi des question nouvelles sur des problématiques communes aux deux domaines, comme l'apprentissage sensorimoteur. L'objectif de cette partie est d'introduire la nécessité d'implémenter, dans la construction de robots autonomes, les capacités d'apprentissage propres à l'être humain : ces stratégies d'exploration sensorielle et motrice que celui-ci met en oeuvre dès la naissance.

Les domaines d'application de l'apprentissage développemental sont nombreux, et il n'existe pas plus de théorie unique qui puisse le mettre en oeuvre quelle que soit l'application, que pour les compétences cognitives de l'être humain. Nous prendrons donc ici l'exemple du contrôle moteur et de l'intégration des informations proprioceptives, qui constituent le socle historique de la recherche en robotique.

2.1 Théorie des systèmes dynamiques

En automatique, la théorie des systèmes dynamiques modélise le mouvement par une équation différentielle du Second Ordre [5] :

$$M\frac{\partial V}{\partial t} = K(X_0 - X) + (B(V_0 - V) \tag{2.1}$$

où X et V représentent la position et la vitesse d'un point repère à chaque instant. X0 et V0 constituent sa position et sa vitesse de commande, et B et K des paramètres dont dépend l'allure du mouvement (il s'agit de la raideur et du coefficient d'amortissement du dispositif ressort-amortisseur équivalent).

Si l'on modifie ces quatre derniers paramètres à chaque instant t, on peut modifier à sa guise la trajectoire de l'articulateur. On peut alors faire en sorte que celle-ci soit soumise à certaines contraintes, comme la minimisation d'une fonction de coût, ou bien la présence de "points de passage" qui permettent de générer des trajectoires plus complexes qu'un simple mouvement d'atteinte.[6]

La théorie des systèmes dynamiques possède des applications dans la modélisation du mouvement humain, par exemple, des gestes articulatoires associés à la parole.[7]

Dans le cadre de la robotique, on réalise ainsi un contrôle dit "en impédance" de notre système moteur. Ces paramètres peuvent être "dynamiquement programmés", c'est à dire modifiés en ligne, dans le cadre de la Théorie du Contrôle Optimal.

2.2 Théorie du contrôle optimal

Initiée par Richard Bellman en 1957 [8] cette théorie est à la base de nombreuses techniques d'apprentissage sensorimoteur.

On peut en résumer les implications en robotique de la manière suivante : à l'instant t0, le robot se voit fixer un objectif dont on peut mesurer la réalisation (déplacement, préhension d'un objet, etc.). Le mouvement du robot peut être considéré comme un ensemble d'états et d'actions possibles, calculés pour chaque instant t suivant.

Pour chacun de ces instants, on peut alors définir une fonction de coût (ou de récompense), qui dépendra de l'action effectuée et de l'état du système à l'instant suivant (t+1). L'objectif est ainsi d'effectuer le mouvement qui minimisera la fonction de coût, ou maximisera la fonction de récompense.

La fonction de coût peut correspondre à de nombreuses grandeurs physiques que l'être humain a naturellement tendance à minimiser, comme la quantité d'énergie dépensée ou encore la quantité de secousses (dérivée de l'accélération) associée au mouvement.

Cette théorie (appliquée par exemple à l'adaptation en impédance des système dynamiques), présente l'avantage d'être aussi efficace pour générer le mouvement d'un robot que pour modéliser certains mouvements chez l'être humain. [9]

2.3 Apprentissage par renforcement

Itérer dans le temps le principe de l'optimalité, en boucle fermée, c'est-à-dire en asservissant la mouvement à l'aide d'un retour sensoriel (proprioceptif). Ceci revient à proposer au robot un apprentissage "par renforcement" : pour atteindre un objectif donné, celui-ci apprend à construire le mouvement optimal selon les contraintes que lui imposent sa propre constitution et l'environnement.

On réalise ce type d'apprentissage de manière incrémentale : le robot apprend d'abord des tâches simples, puis on lui fixe des objectifs de plus en plus complexes.

On peut ainsi construire un système de valeurs auxquelles le robot devra obéir : on associera une valeur positive au mouvements qui favorisent la tâche désirée par le créateur, et une valeur négative aux mouvement qui iront dans le sens contraire. Après suffisamment d'apprentissage sensorimoteur, le robot sera ainsi capable de créer spontanément des comportement qui satisferont la volonté de son programmeur.

Utilisé tel quel, ce procédé possède cependant de nombreuses limites. Le mouvement à réaliser peut en effet posséder, à l'instar de ceux réalisés par un humain, de très nombreux degrés de libertés. Aussi, l'évaluation de la fonction de coût peut rapidement devenir très coûteuse en énergie, en temps et en données : la durée et la richesse de l'apprentissage s'en trouvent donc, elles aussi, limitées.

Qui plus est, ce type d'apprentissage est mal adapté à l'incertitude des données perceptives et proprioceptives renvoyées par les différents capteurs du robot. Enfin, cela n'est sensé fonctionner que pour un certain type de tâches préalablement définies par le créateur du robot : celui-ci ne peut, avec ces algorithmes, faire preuve d'aucune initiative lors de son interaction avec l'environnement. Son seul souci sera celui de la réalisation optimale d'une tâche prédéfinie, ou provoquée par un stimulus : on parle de "motivation extrinsèque".

Il ressort de ces différentes observations, la nécessité de réduire la complexité du problème pour chaque situation à laquelle le robot se trouvera confronté. Cette réduction implique une sélection par le robot lui-même des données à analyser, ainsi que de l'expérience à vivre pour un apprentissage optimal de ses capacités d'interaction avec son environnement. On parle d'apprentissage actif, déclenché par le besoin d'initiative mentionné plus haut.

L'apprentissage développemental par renforcement consiste à imiter les compétences précoces du petit enfant, afin de simuler cet apprentissage actif. Il s'agit d'introduire, dans le programme d'exploration du robot, des sources d'intérêt endogènes, ou "motivation intrinsèque".

2.4 Motivation intrinsèque dans le cas de l'apprentissage sensori-moteur

Dans le contexte de l'apprentissage par renforcement, le robot associe à chacune de ses actions (mouvement d'un bras par exemple), une prédiction sur son état à l'issue de cette action (position supposée du bras à la fin du mouvement). A partir de ses données sensorielles (proprioceptives), le robot peut alors évaluer l'erreur résiduelle entre le résultat de son action (position effective du bras après mouvement) et sa prédiction. C'est cette fonction d'erreur qui constituera la fonction de coût à minimiser dans le cadre du contrôle optimal de l'action.

Supposons maintenant que le robot tienne un registre de toutes les valeurs d'erreur, sur tous ses mouvements, en fonction du temps. Il lui est alors possible de déterminer, pour chaque tâche effectuée, la vitesse de diminution de l'erreur - c'est à dire, la facilité associée à cette tâche, qui dépend de ses connaissances actuelles sur l'environnement et sur ses propres capacités motrices.

Cette évaluation de la facilité détermine un facteur d'intérêt pour chaque tâche, et le robot peut alors choisir d'apprendre celle qui sera, pour lui, la plus "intéressante" : ni trop facile (déjà apprise), ni trop difficile à ce stade de son développement sensorimoteur.

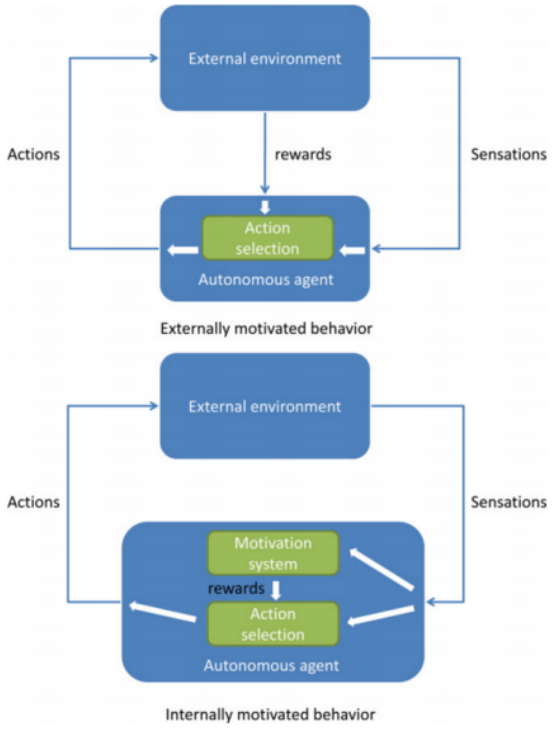


FIGURE 2 – Illustration des mécanismes de motivation intrinsèque et extrinsèque dans le processus d'interaction avec l'environnement. La figure provient de [10]

La sélection autonome des mouvements, puis des tâches à réaliser sur un critère d'intérêt permet l'implémentation d'une source intrinsèque de motivation, et donc d'un comportement spontané (voir figure 2). [11]

L'apprentissage par motivation intrinsèque n'est cependant efficace que si le robot possède un minimum de connaissances a priori sur son système sensorimoteur. Plusieurs techniques peuvent être successivement appliquées pour fournir au robot ce minimum.

2.5 Babillage moteur

Le babillage sensorimoteur est l'une des applications les plus concrètes de l'apprentissage développemental par renfor-

cement. Il s'agit d'une imitation directe du phénomène de babillage chez les jeunes enfants.

Le robot s'éveille avec un minimum de connaissances a priori sur son propre appareil sensorimoteur. Il décide alors de mouvements au hasard, d'intensité et de complexité croissantes. [12]

L'adéquation entre ses prédictions et ses mouvements effectifs façonne alors ses capacités mobiles et proprioceptives.

2.6 Téléopération

Une fois le robot conscient de ses capacités, il est possible de lui apprendre certaines tâches sur lesquelles celui-ci appuiera ensuite ses capacités de généralisation. La manière la plus simple de procéder est de lui faire effectuer (par contact direct, ou à distance) certains mouvement soigneusement contrôlés par un opérateur humain. [13]

Le robot n'aura qu'à "sentir" les mouvements associés à la tâche avant de tenter de les reproduire à l'identique. La téléopération s'avère une stratégie efficace pour pallier le problème de la réduction des mouvements possibles.

Une fois ce type d'apprentissage terminé, le robot est capable d'effectuer un certain nombre de tâches de complexité variable. Il s'agit désormais de mettre en oeuvre le processus de motivation intrinsèque au sein d'un environnement inconnu, avec lequel celui-ci peut apprendre à interagir, soit de manière autonome, soit guidé par un système supplémentaire de récompenses, selon le type d'actions souhaitées et la complexité du problème.

2.7 Interaction avec d'autres agents : apprentissage par imitation

Pour finir, une autre stratégie pouvant être utilisée pour réduire le problème du nombre de mouvements possibles, consiste en l'apprentissage par imitation, ou "apprentissage par guidage social".

Il s'agit ici d'imiter la capacité spontanée de l'enfant (et de tout autre animal) à reproduire spontanément un mouvement réalisé par un de ses congénères, et ce sans apprentissage préalable.

Dans ce paradigme, l'objectif du robot est donc d'imiter le plus précisément possible l'action démontrée par un être humain. Une manière d'implémenter cet objectif est d'associer la fonction de coût propre à l'apprentissage par renforcement, à l'écart séparant le mouvement du robot de celui de l'être humain. [14]

Conclusion

Nous avons donc, dans cet article, étudié les différents niveaux d'apprentissage chez l'humain : une approche top-down comportementale, qui permet de rendre compte du développement de processus de haut niveau tels que la compréhension du langage, le début de la parole et le début des intéractions sociales.

Puis, dans une progression du type bottom-up, nous avons déroulé l'exemple d'une certaine manière d'inférer l'apprentissage sensori-moteur. Ceci afin d'illustrer la nécessité du concept de motivation intrinsèque, qui constitue une source d'attention endogène, ou encore la ?curiosité artificielle ?. C'est à cet endroit précis que se rejoignent le "raisonnement" d'un jeune robot et celui d'un tout jeune humain : c'est par cet instinct que ceux-ci se rendent capables de comportements similaires, comme le babillage ou encore l'imitation.

De nombreux progrès restent encore à faire dans l'étude de l'apprentissage développemental, chez l'Homme comme chez le Robot, comme à travers, par exemple, l'identification du Robot à l'Homme dans l'apprentissage par imitation.

Références

[1] K. Li and M. Q.-H. Meng, "Learn like infants : A strategy for developmental learning of symbolic skills using humanoid robots," *International Journal of Social Robotics*, pp. 1–12, 2015.

[2] K. J. Gerhardt and R. M. Abrams, "Fetal exposures to sound and vibroacoustic stimulation." *Journal of perinatology : official journal of the California Perinatal Association*, vol. 20, no. 8 Pt 2, pp. S21–30, 2000.

[3] P. D. Eimas, E. R. Siqueland, P. Jusczyk, and J. Vigorito, "Speech perception in infants," *Science*, vol. 171, no. 3968, pp. 303–306, 1971.

[4] P. A. Hallé and B. de Boysson-Bardies, "Emergence of an early receptive lexicon : Infants' recognition of words," *Infant Behavior and Development*, vol. 17, no. 2, pp. 119–129, 1994.

[5] A. Rolland de Rengerve, "Apprentissage interactif en robotique autonome : vers de nouveaux types d ?ihm." *tel-00969519*, pp. 22–26, 2013.

[6] S. Chiaverini, B. Siciliano, and L. Villani, "A survey of robot interaction control schemes with experimental comparison," *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions On*, vol. 4, no. 3, pp. 273–285, 1999.

[7] J. A. Kelso, E. L. Saltzman, and B. Tuller, “The dynamical perspective on speech production : Data and theory,” *Journal of Phonetics*, vol. 14, no. 1, pp. 29–59, 1986.

[8] R. Bellman, “Dynamic programming,” 1957.

[9] E. Todorov and M. I. Jordan, “Optimal feedback control as a theory of motor coordination,” *Nature neuroscience*, vol. 5, no. 11, pp. 1226–1235, 2002.

[10] J. Gottlieb, P.-Y. Oudeyer, M. Lopes, and A. Baranes, “Information-seeking, curiosity, and attention : computational and neural mechanisms,” *Trends in cognitive sciences*, vol. 17, no. 11, pp. 585–593, 2013.

[11] A. G. Barto, S. Singh, and N. Chentanez, “Intrinsically motivated learning of hierarchical collections of skills,” pp. 112–19, 2004.

[12] Y. Demiris and A. Dearden, “From motor babbling to hierarchical learning by imitation : a robot developmental pathway,” 2005.

[13] W. D. Smart and L. P. Kaelbling, “Effective reinforcement learning for mobile robots,” vol. 4, pp. 3404–3410, 2002.

[14] M. Lopes, F. Melo, L. Montesano, and J. Santos-Victor, “Abstraction levels for robotic imitation : Overview and computational approaches,” pp. 313–355, 2010.

L'Intelligence Artificielle au service de l'art génératif

Approfondissement dans l'art pictural à travers l'exemple du projet eDavid

Yves Brozat & Antoine Grimaldi
Master AST & Master Sciences Cognitives
Année universitaire 2015/2016
yves.brozat@ense3.grenoble-inp.fr
antoine.grimaldi@phelma.grenoble-inp.fr

Abstract*— Ce document présente un travail de recherche sur la capacité qu'ont des systèmes d'Intelligence Artificielle à générer des oeuvres artistiques. Il présente dans un premier temps les aspects essentiels à retrouver dans une création artistique, de la nécessité d'imprévu à la faculté de procurer des émotions et à être expressif, et les possibilités d'incrémentation de ces facteurs dans des algorithmes génératifs. Dans un second temps est présenté un état de l'art des technologies robotiques existantes appliquées dans différents domaines artistiques et capables de générer des créations artistiques. Enfin, e-David, robot peintre, est présenté plus en détail dans une troisième partie afin d'identifier les compétences techniques de ce type de robotique. Au terme des discussions autour de cet exemple, et plus largement autour de la machine capable de remplacer le travail artistique de l'homme, on peut considérer que le robot est un outil de création artistique ou une oeuvre d'art à part entière, mais il est important de remettre en cause la capacité qu'a un robot d'être créatif du fait que son automatisation totale exclut la présence de sensibilité, d'émotion, qui sont des éléments humains indispensables à la créativité.

***Keywords*— robotique; Intelligence Artificielle; art; créativité; eDavid**

I. Introduction

La peinture est sans doute le dernier domaine dans lequel on s'attendrait à voir exceller des ordinateurs. Elle s'oppose à l'objectivité, la précision et les règles mathématiques des machines par ses aspects abstrait, émotif, subjectif et lié aux cultures, à la psychologie. Mais ces antagonistes ne sont peut être pas si éloignés qu'il n'y paraît. La peinture ainsi que d'autres formes d'art visuel doivent beaucoup aux mathématiques à travers la géométrie, la perspective et les algorithmes auxquels les ordinateurs adhèrent pour générer des images aussi variées et subtiles que les créations d'un véritable artiste. L'art et la robotique pourraient-ils se rejoindre pour étendre les capacités de création humaine et même les dépasser. Par cet écrit, nous essayerons de définir les notions principales qui caractérisent l'art et la créativité et nous verrons s'il est possible de les appliquer au domaine de la robotique et de l'Intelligence Artificielle.

II. Comment generer l'art a travers un processus automatise

A. Analyse de la création artistique

Il est difficile de caractériser l'art et d'en trouver ses secrets à tel point qu'on en vient à dire que la créativité artistique provient d'une faculté humaine qu'on ne peut remplacer par les algorithmes d'une machine et qu'une conséquence d'actions automatiques ne peut porter le nom d'oeuvre d'art. L'art est même devenu le dernier soldat contre la guerre technologique et le remplacement de l'homme par l'automatisation des tâches et la robotisation.

Imaginer qu'une oeuvre puisse être produite sans l'intervention de l'humain nécessite de comprendre ce qu'un sujet interprète derrière les mots de création artistique. Ceci étant fait, il sera plus aisé de trouver des moyens technologiques et des algorithmes permettant de reproduire le processus de création.

Pierre Berger, créateur du logiciel Roxame [1], propose d'éclaircir le terme de création artistique et on se basera sur cette définition pour déclarer que l'art existe en toute oeuvre dans la mesure où elle entraîne l'émergence d'incertitude : l'imprévu découlant de l'originalité et de l'inédit est le premier facteur essentiel d'une création artistique. Le deuxième facteur réside en l'expressivité de l'oeuvre artistique: elle se doit de procurer une expression à celui qui la reçoit, que ce soit du plaisir ou de l'émotion. Finalement, l'art répond en dernier lieu à des processus créatifs récurrents dont chaque artiste se doit d'avoir les clefs, où la construction progressive de son oeuvre traduit des règles systématiques de création.

Mais l'imprévu comme l'expression semblent au premier abord impossibles à robotiser dans la mesure où la subjectivité prend une place importante au débat, mais il est toutefois intéressant d'approfondir ces recherches.

B. Générer l'imprévisible

Chercher à robotiser l'art revient d'abord à tenter de programmer l'incertitude qui modèle le travail artistique. La première approche consiste à faire recours au hasard, définit par l'expression d'un manque apparent des causes d'un évènement et l'incapacité à appréhender complètement certains phénomènes naturels et de les prévoir.

La difficulté réside alors dans la capacité à programmer ce phénomène pour qu'il en résulte une conséquence hasardeuse, ou plutôt aléatoire, telle qu'il est complexe de déterminer sa nature pour un système informatique.

Il existe des algorithmes génératifs complexes de pseudo hasard qui reposent sur l'incapacité qu'a l'être humain d'effectuer les opérations correspondantes et permettent ainsi de générer un hasard dont les régularités inévitables resteront imprévisibles à l'échelle de l'intelligence humaine.

D'autre part, il est possible d'aller au devant de l'appréhension humaine par la combinaison de ces algorithmes avec des ressources internes "passives" telles que des données ou du média en quantité suffisante pour qu'il soit impossible de s'en souvenir en détail. Dans le cas d'un système interactif, ces ressources peuvent provenir d'Internet, ou de phénomènes physiques captés et imprévisibles, rendant le système incertain. Le robot artiste d'Harvey Moon qui capte et retranscrit le mouvement d'un insecte enfermé dans une boîte en est un bon exemple.

C. Générer l'expression

Malgré le fait que l'imprévisible peut être créé, il reste toutefois important de générer un imprévisible intéressant. Il est alors nécessaire d'édifier des critères esthétiques qu'on est en mesure de programmer afin d'aspirer à l'élaboration d'une oeuvre évoquant le "beau", ou qui soit source de plaisir et d'émotions.

Ces critères restent complexes à déterminer étant donné l'état de la critique artistique dans le monde actuel qui s'est vu disparaître pour être remplacé par une subjectivité binaire qu'on se doit éthiquement de suivre, par respect de l'artiste et de l'oeuvre : on ne peut plus dire aujourd'hui si c'est beau ou laid, on ne peut qu'aimer ou non.

Cependant, les recherches portées lors du développement de Roxame (//// reference ////) ont mené à la transcription de quelques règles esthétiques de base, tel qu'un modèle empirique d'optimum de complexité permettant, en laissant matière à débattre, de déterminer, pour générer une image, un nombre de pixels qui doivent différer de leurs voisins afin d'optimiser l'esthétisme. Parmi les autres critères testés par cette équipe, il y a le cadrage correct des parties intéressantes de l'image, l'emploi complet de l'espace des couleurs (couverture de la gamme de tons, saturations et valeurs, contraste, variété de la palette), ou encore la richesse sémantique qui sera développée ci-après.

Des méthodes algorithmiques interviennent alors pour respecter ces critères par l'introduction de contraintes, qui agissent en cadrant le flux aléatoire généré, se recoupant sous le concept de filtre. Ce processus de filtrage peut aller jusqu'à tenir compte de toute l'image et du système pour la génération d'un des pixels. D'autres solutions mettent en oeuvre une projection de ce flux aléatoire dans des algorithmes génératifs permettant par exemple de donner un caractère "naturel" à des tracés de trait. Nombreux artistes expérimentent ces méthodes, comme avec Schillinger pour la musique, Calliope pour le texte ou Aaron en 1970 pour la peinture.

Dans ces méthodes, les critères d'esthétisme sont introduits dès la création du flux aléatoire générant l'oeuvre et sont évalués à la fin du cycle de génération. Cependant, il est souvent intéressant d'évaluer la création pas-à-pas et de créer ainsi des boucles d'essai-correction, se rapprochant du processus de création de l'artiste humain.

D. Structuration du système

La création d'oeuvres imprévisibles et expressives passe par la construction progressive de système qui développent leur complexité de manière de plus en plus structurées. Ces architectures conjuguent deux structures de base : la séquence et la boucle.

La séquence globale conduit l'oeuvre de la page blanche à son achèvement qui peut se décomposer en sous-séquences. Et une séquence créative n'est pas réversible, il peut y avoir des retours en arrière, mais le système avance toujours en complexité croissante. Une oeuvre peinte se construit d'abord par l'élaboration du modèle général, qui s'affine et se précise sous forme d'esquisse et de passage à des formes complètes, qui s'assemble éventuellement avec d'autres composants et se termine par une touche finale.

Au cours de cette linéarité s'intègre des boucles, telles que :

- les opérations itératives sur l'ensemble des pixels ou des formes
- la répétition d'opérations jusqu'à obtention d'un résultat
- le cycle même du processeur
- les cycles introduits par le programmeur (timers)
- les boucles d'interaction avec des capteurs extérieurs

Afin d'organiser ces structures itératives, les boucles et les séquences sont disposées en couches. Au niveau le plus global, deux types d'architectures président et se défendent : les architectures dites "centralisées" et "connexionnistes".

Les architectures centralisées vont être hiérarchisées par un processeur principal, ainsi la variabilité pourra être intégrée dans certains niveaux de la hiérarchie mais la définition impérative du modèle limitera l'adaptation du logiciel.

Les modèles connexionnistes posséderont une variabilité plus grande en essayant de copier le fonctionnement biologique du réseau de neurones qui produisent la pensée humaine. Des tâches de cognition de plus haut niveau pourront être réalisées par la machine en utilisant le Deep Learning. En effet, sur certaines machines il est désormais possible d'accéder à une forme de représentation (qui modélise l'esprit humain) pour catégoriser des scènes naturelles par exemple. L'utilisation de l'apprentissage et du connexionnisme pourraient être la base d'une créativité automatisée.

D'esprit opposé, ces deux approches peuvent se combiner. Dans un système robotique, par exemple, il peut être opportun de se contenter d'algorithmes impératifs à bas niveau (pilotage élémentaire des moteurs) et de faire en revanche un large appel au connexionisme au niveau le plus élevé, celui des intentions et des émotions.

E. Conclusion

Générer de l'art ne semble plus être une idée si ambitieuse et irréaliste. Dans la mesure où c'est une notion toujours aussi difficile à clarifier, juger si le rendu du travail d'une machine ne relève en aucun cas de l'art est une position qu'on ne peut plus défendre aujourd'hui. La définition de l'art créatif telle que présentée - devant à la fois susciter de l'émotion, être expressif, et garder une part d'imprévisible, d'originalité ou de surprise - n'est plus inaccessible par un ordinateur : l'Intelligence Artifielle aujourd'hui permet aux oeuvres générées automatiquement de répondre à ces deux attentes, en ayant recours au hasard recoupé à des bases de données virtuelles infinies et en implémentant des critères esthétiques identifiables et acceptées. De plus, il est possible de recouper le processus de création artistique par la structuration algorithmique d'un système, capable désormais de copier le fonctionnement biologique du réseau de neurone humain.

III. ETAT DE L'ART DE LA ROBOTIQUE ARTISTIQUE EXISTANTE

L'art génératif se basant sur des algorithmes pour concevoir des oeuvres se générant d'elles-mêmes s'est démocratisé au cours de ces dernières décennies et touchent l'ensemble des domaines artistiques. Dans l'ère du numérique et de la communication visuelle, la création picturale prédomine également dans ce milieu, mais elle n'est pas seule. L'art génératif s'expand dans les autres domaines artistiques ne prenant plus le pixel comme élément de base mais parfois les mots pour générer des textes et des poésies, ou les notes pour générer de la musique.

A. Dans le domaine de la peinture

Aaron est un logiciel conçu par l'artiste Harold Cohen qui génère des images artistiques originales et créé des réelles peintures physiques. Il se développe depuis 1973 et est de ce fait le pionné dans son domaine. Il part de la question initiale de "Quelles sont les conditions minimales en vertu desquelles un ensemble points forment une image ?" Les premières versions d'Aaron génèrent des dessins abstraits qui augmentent en complexité pendant les années 70. La décennie suivante apparaissent davantage d'image représentatives telles que des cailloux, des plantes, puis des gens, et Aaron apprend à les situer dans des environnements 3D. Dans les années 1990, des figures représentatives sont élaborées dans des scènes d'intérieures, incluant pour la première fois le pixel colorisé. Au début des années 2000, Aaron revient vers des dessins plus abstraits, mais cette fois en couleur.

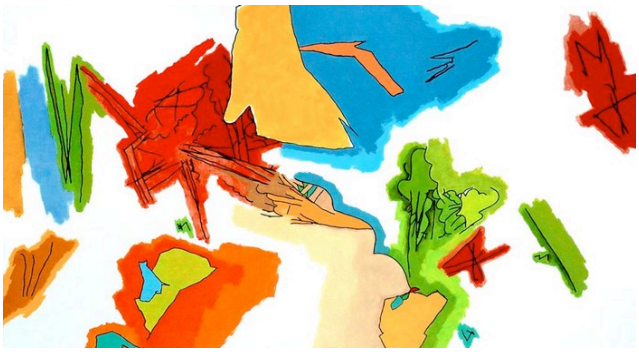


Figure 1 – Peinture créée par Aaron

Benjamin Grosser reprend certaines idées de Cohen dans le projet Interactive Robotic Painting Machine réalisé en 2011, qui consiste à créer des peintures à l'huile abstraites sur toile à partir des sons qu'il capte dans son environnement, agrémentant le robot d'une certaine multimodalité. Les entrées audios du système influencent ainsi le machine-peintre au fur et à mesure que l'oeuvre est créée.

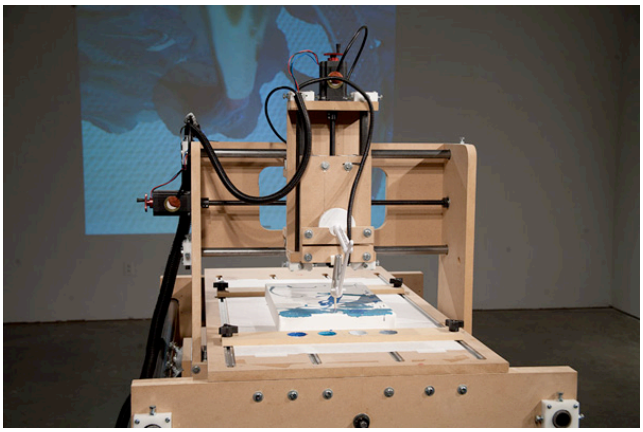


Figure 2 - Interactive Robotic Painting Machine

Le troisième projet est celui sur lequel on s'est penché le plus en détail étant donné la qualité des résultats : il porte le nom d'e-David [3]. Il a été réalisé par Oliver Deussen et Thomas Lindemeier de l'Université de Konztanz en Allemagne et consiste à utiliser des boucles de retours visuels pour essayer d'imiter la façon dont à un peintre de créer ses oeuvres. Les illustrations sont présentées dans la section suivante.

Sans la notion physique du robot mais simplement l'aspect art génératif, le projet The Painting Fool est porté par le professeur Simon Colton de l'Université de Londre Goldsmiths College en 2001. L'intention initial réside simplement dans l'idée de programmer un logiciel capable de convertir des photographies en oeuvre d'art, où l'altération s'accorde à des modèles émotionnels définis par des mots-clés que l'AI parvient à déterminer lui-même. L'exemple suivant illustre une interprétation du Painting Fool de la guerre en Afghanistan, reprenant des photos Flickr qu'il a astucieusement trouvé tout seul.

Figure 3 – Interprétation de Painting Fool sur la guerre en Afghanistan

B. Dans le domaine de la musique

Difficile d'imaginer un robot jouant physiquement de la musique quand le chemin entre les programmes de synthèse de son et les hauts parleur est si proche. Ainsi, les projets présentés ci-après sont des logiciels d'art génératif, que l'on peut dans une certaine mesure considérer comme robot à part entière.

- Melomics109 et Iamus sont deux logiciels de composition musicale algorithmique développés par des chercheurs de l'université de Malaga, respectivement en 2013 et 2010.

- OMax est un logiciel développé par trois chercheurs de l'IRCAM permettant de reproduire en temps réel le style de musique du son capté par la machine. Ceci donne lieu aux premières co-improvisations homme-machine de l'histoire de la musique.

- Dans le milieu de la musique pour jeux vidéos, le projet Mezzo développé en 2012 par le compositeur Daniel Brown parvient à composer des pistes audio en temps réel dans un style neo-romantique en concordance avec les expériences et actions du personnage.

C. Dans le domaine de l'écriture

Scheherazade est un programme capable de rédiger de courtes fictions d'un ou deux paragraphes. Il a été réalisé par Mark Rield. "Elle n'utilise aucune connaissance préprogrammée, elle apprend tout ce qu'elle doit savoir pour créer son histoire." Les récits produits sont, assure-t-il, "difficiles à distinguer de ceux écrits par les humains".

IV. L'EXEMPLE D'EDAVID

Pour se pencher sur un cas concret qui illustrerait l'interaction entre la robotique et l'art on s'intéressera plus particulièrement au robot eDavid qui est capable non seulement de reproduire des tableaux de maîtres mais qui créé son propre style en analysant les toiles qu'il est en train de peindre. Ce projet a débuté en 2009 dans l'Université de Constance, en Allemagne, avec pour but initial d'implémenter un robot capable de faire ses propres coups de pinceau sur une vraie toile. Cet ancien robot industriel utilisé dans les chaînes d'assemblage d'automobiles pour réaliser des soudures a été modifié pour peindre de manière autonome grâce à 5 pinceaux différents et une palette de 24 couleurs. Il ne se contente pas de vulgairement reproduire l'image qui lui sert de modèle mais est capable de suivre son oeuvre en temps réel et d'y ajouter un dimension artistique.

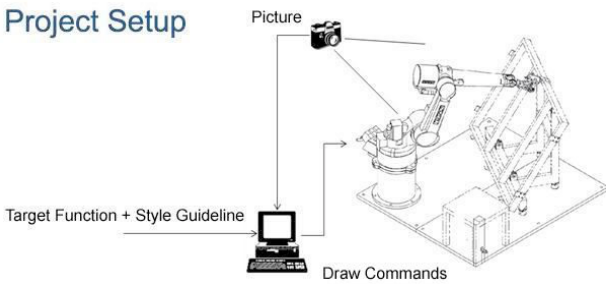


Figure 4 – Illustration du robot e-David

eDavid est un robot industriel (Reis RV20-6) équipé d'un système lui permettant de saisir 5 pinceaux différents qu'il utilisera lors de la création de sa peinture. Il est en mesure d'utiliser 24 couleurs différentes en trempant mécaniquement le pinceau dans les différents pots de sa palette[4]. Il est prévu qu'il puisse facilement laver et sécher son pinceau. Grâce à des capteurs de distance qui sont fixés sur son bras, le robot pourra s'adapter à sa toile, si celle ci est courbée par exemple, et aux mouvements qu'il réalise par rapport à elle. On obtient une tolérance de l'ordre du millimètre mais toujours visible pour des images avec de longues trainées et un petit pinceau.

Des feedbacks visuels sont formés par un appareil photo numérique (Canon EOS 5D Mark II SLR) utilisé en vidéo avec une sensibilité de 21MPixel et une lentille fixe de 50mm. On obtient une résolution d'1 mm sur la toile. Deux tubes fluorescents avec des filtres de polarisation éclairent la toile sachant que la caméra possède également un filtre de polarisation.

Le robot est contrôlé par un serveur par des commandes XML qui facilitent sont usage. La plupart des commandes sont simples telles que sélectionner d'un pinceau ou dessiner mais quelques commandes spécialisées pour représenter la toile et utiliser les pinceaux et les couleurs ont aussi été implémentées. Un autre serveur est utilisé pour l'appareil photo. Les images sont créées sur un espace XYZ et calibrées en utilisant un algorithme des calibration géométrique et un set de couleurs [5]. La calibration spatiale est de l'ordre du pixel et la calibration des couleurs se fait avec une précision de 5%, ce qui est suffisant pour les applications qui lui sont demandées mais qui pourrait être amélioré à l'avenir.

Pour le choix du coup de pinceau à réaliser, le logiciel utilise une technique appelée Line Integral Convolution. Cette méthode sélectionne les principales caractéristiques de l'image qui se créée afin de constamment comparer les deux images. Le logiciel peut alors utiliser deux modèles différents de définition des points de peinture à réaliser: un modèle prédéfini qui sera simplement calculé à partir des informations de l'image entrée et un modèle dynamique qui évoluera en fonction de l'avancement de la peinture. Un recoupement de ces deux modèles va donc créer une dimension créative au travail d'eDavid.

Les résultats actuels d'eDavid montrent qu'il est capable de se servir de tout type de pinceau ou stylo ainsi qu'utiliser l'encre comme la peinture à l'huile ou acrylique. Les imprécisions mécaniques du bras articulé sont bien compensées par le retour d'information fourni par la caméra. De plus, ces feedback permettent non seulement d'être précis mais également de développer des techniques pour améliorer la peinture et y rajouter une touche personnelle. A chaque modification apportée au dessin, il capture une photo à l'aide de sa caméra et calcule à partir de l'image les endroits de la réalisation nécessitant des touches de couleurs plus claires ou plus sombres. Cette opération permet au robot de définir s'il doit changer de pinceau, de couleur et où il doit appliquer la prochaine touche de peinture. Au lieu de suivre une série d'instructions préenregistrées par un programmeur, le dispositif est capable d'analyser son œuvre en temps réel et d'effectuer des choix de manière autonome, pour améliorer l'aspect général de son travail en progression.

Les figures suivantes sont les résultats qu'a pu obtenir le robot eDavid.

Figures 2a. et 2b. – Peintures réalisées par eDavid avec différents styles

Figure 3 – Toile réalisée par eDavid avec un stylo et de l'encre

Les peintures obtenues par eDavid peuvent sans aucune hésitation être caractérisées comme artistiques. Les différents styles utilisés par le robot, l'aspect esthétique non discutable en font des oeuvres acceptées par le plus grand nombre. Cela dit, peut on qualifier de créative la démarche empruntée par le robot? Le fait qu'un style voulu soit implémenté, même si les résultats ont une grande part d'incertitude et surprennent parfois les programmeurs, est une réelle preuve des limites du logiciel. On peut également se poser la question de la sensibilité artistique du robot pour en déduire qu'il n'a pas de réel goût pour son travail et qu'il serait alors difficile de le comparer à un artiste.

V. Discussion

De nombreuses questions se posent alors quant à la possible sensibilité artistique des robots et leur place dans l'art

et la culture. On pourrait tout simplement voir un robot comme faisant partie d'une oeuvre ou étant un simple outils de création. Ce genre de performance est réalisé chaque jour et une exposition intitulée "Art Robotique" à la Cité des Sciences de Paris était un bon aperçu des productions possibles au niveau artistique grâce aux machines et aux nouvelles technologies. L'art et la technologie se confondent de plus en plus et offrent un champ de possibilités inouïe pour les créateurs avides de robotique. Mais lorsqu'on parle de robot en temps que créateur artistique des questions se posent toujours.

A travers cet état de l'art de la robotique dans le monde artistique, nous avons vu que le comportement de certaines machines était similaire à celui d'un être humain créatif. A l'instar de l'artiste, eDavid est capable de corriger sa toile en temps réel en fonction des retours visuels qu'il en a. Des logiciels de composition musicale ou encore des robots danseurs peuvent s'adapter à leur environnement et aux informations qui leurs parviennent pour créer une harmonie en accord avec la perception humaine. On a vu que ces intelligences artificielles dépassaient même les attentes de leurs créateurs et montraient une certaine forme d'indépendance, d'incertitude, propres à la création.

Au niveau du comportement et des résultats obtenus, les robots actuels peuvent donc être considérés comme des artistes, comme des créateurs et c'est bien la notion de créatif qu'il faut alors définir. Selon Mark Riedl, chercheur en IA au Georgia Insitute of Technology, les robots sont déjà doués de créativité: "Beaucoup de gens pensent à de grands artistes quand on utilise le terme de créativité. Mais chaque humain est créatif dans une certaine mesure, et cette créativité se manifeste au quotidien, des dizaines ou des centaines de fois par jour. Nous faisons preuve de créativité quand nous jouons au Pictionnary, quand nous utilisons un trombone pour réparer une paire de lunettes ou quand nous trouvons un autre itinéraire pour rentrer chez nous si une route est fermée. Les ordinateurs sont déjà dotés de cette forme de créativité."

De plus, les psychologues s'accordent à dire que l'imagination n'est qu'une recombinaison de perceptions déjà existantes dans l'esprit humain. Elle est issu de notre vécu et les techniques d'apprentissage appliquées aux machines peuvent très bien doter nos intelligences artificielles de mémoire et leur inculquer la capacité de mixer ces informations pour en créer de nouvelles. Un équipe de Google a développé un programme appelé Deep Dream qui crée des images fantasmagoriques impressionnantes à partir de la base de données gigantesque qui lui est fournie par Internet. Pourquoi la créativité artistique d'une machine est-elle toujours remise en question?

C'est Alan Turing qui le premier a fait la comparaison entre l'homme et la machine et a proposé un test pour caractériser le comportement de la machine d'intelligent ou non en comparaison avec l'esprit humain. Mark Riedl a suivi la même démarche pour la créativité, en concevant en 2014, le test de Lovelace 2.0. Dans cette expérience, les juges demandent à un programme de créer une oeuvre (peinture, poésie, architecture, …) en lui imposant un thème non define à l'avance. Aucune machine n'a pour l'instant réussi à le passer.

La question de la compréhension se pose alors, car, tout comme l'exemple de la chambre chinoise, il est possible de donner une réponse correcte, de se comporter comme voulu, sans pour autant comprendre le fonctionnement du test. Et c'est bien sur ce point que le débat porte en intelligence artificielle, les robots peuvent-ils être dotés de conscience? Lorsqu'on s'intéresse au domaine des arts on peut parler de ressenti, de sensibilité, ce sont des termes essentiels pour un artiste. Or, les robots ne connaissent pas les émotions et même s'ils peuvent les simuler ou peut être en créer chez l'individu, eux-mêmes sont étrangers à ce concept. Pour Micheal Cook, chercheur à l'université de Londres, "Ce genre de chose est vraiment important pour la créativité – c'est comme ça qu'on se sent lié aux autres, qu'on est touché par des artistes. Nous comprenons souvent le travail des artistes en le comparant avec nos propres vies. Expérimenter la guerre, l'amour, avoir une histoire avec une ville, un pays… L'IA a du mal à avoir ce genre d'impact car nous partageons moins de choses avec elle qu'avec d'autres humains.

En partageant cette vision, il est alors impossible d'attribuer le statut d'artiste à une machine. Le robot serait simplement un outils pour la création artistique qui reste propre à l'être humain. Mais peut être que ces nouvelles approchent sont intéressantes pour nous permettre d'en apprendre sur notre propre créativité, offrir un point de vue objectif et neutre sur nos démarches. Car finalement, ils nous est toujours difficile de bien définir le cadre de l'art, de poser des notions très concrètes sur la créativité, l'imagination, l'émotion, ce sont autant de concepts qui nous dépassent encore. Comment serait-il possible de doter une intelligence entièrement programmée par l'humain de notions qu'il ne maîtrise pas totalement lui-même?

REFERENCES

[1] P. Berger "Art, algorithmes, autonomie. Programmer l'imprévisible", 22es Journées de l'Association Francophone d'Informatique Graphique, Arles 2009

[2] C. Santos, N. Monteiro, J. Fonseca, P. Garrido, Carlos Couto, "Control of a Robot Painting System Using the Multi-resolution Architectural Principle"

[3] P. Tresset & O. Deussen, "Artistically Skilled Embodied Agents", Vortag gehalten bei: AISB 2014, 1st -4th April 2014

[4] Carlos Aguilar, Hod Lipson, "A robotic system for interpreting images into painted artwork", Cornell Computational Synthesis Lab, Cornell University, Ithaca,NY, USA

[5] A. Sandkleiva, "Painting Robot With A Paint Supply System,"

[6] Sources venant de sites internet des projets présentés:
http://www.informatik.uni-konstanz.de/en/edavid
http://bengrosser.com/projects/interactive-robotic-painting-machine/#related
http://guizmag.com/edavid-robot-artist-painter/28310/
http://thepaintingfool.com/index.html

Social Presence of Smart Spaces

"Maybe a house can be a home only once it can appreciate your jokes"

Lucien Bobo
Art Science Technologie Master's degree
Phelma – Grenoble INP
Grenoble, France
lucien.bobo@phelma.grenoble-inp.fr

Louise Charpentier
Cognitive Science Master's degree
Phelma – Grenoble INP
Grenoble, France
louise.charpentier@phelma.grenoble-inp.fr

***Abstract*—There is an increasing body of attempts to transpose the way human beings interact socially between each other to human-robot interaction. Given the evolution of so-called *smart spaces*, we question the possibility to extend these considerations to robotic systems at different scales, looking at complementary works from the past decades. It seems that links could be made between parallel current investigations, possibly meeting visionary ideas formulated at an early stage of this highly interdisciplinary research issue.**

Keywords—domotics; smart homes; social robots; ubiquitous computing

I. Introduction

As living beings, we are profoundly affected by the environment that surrounds us. Throughout history, we have been increasingly living in an artificial environment. While architecture has ever been concerned with adapting the built environment to human practises, architectural spaces have also been considered, more recently, as computing units. Indeed, the past decades have witnessed the emergence of possibilities such as increasingly responsive, and even adaptive environments. Going further than a static comfortable atmosphere with constant light, humidity and temperature, adaptive architecture leads to more "intelligent" behaviours.

In his secular book, *Soft Architecture Machines* [1], Nicholas Negroponte draws a speculative overview of what such architectures open for. He attributes social qualities to architectural spaces, and questions the consequences of such a presence in the everyday life. As of today, it seems difficult to track the diffusion of these ideas, but they are partially embodied within different fields.

In an attempt to define smart spaces characteristics, we will review concepts that merge from social robotics to computer science, then question the social aspect of such spaces, raising the problem of social interaction with ubiquitous technologies. Finally, we wish to question a continuity in different scales of human-robot interaction, wondering whether we could overcome bodily issues of the artificial intelligent agent. Thus we try to link a potential enrichment of the human ability to develop relationships with artificial entities with current achievements in ambient intelligence.

II. Smart Spaces: from Cognitive Psychology to Computer Science

The concept of *intelligence* commonly stems from analogies to human behaviour. Thus, when speaking of intelligent artificial agents, we here mainly refer to the attempt of implementing human-derived inference behaviours within objects; and more recently, spaces.

The architecture we consider for an interactive system is the following: sensor networks dedicated to data collection, integrative central or distributed units, and action pathways that will define the range of action of the agent. Such agents are reactive systems built on Perception-Action Loop theories, supported by models for interpreting human behaviours [2]. These situation models also respond to a presently spread opinion in cognitive psychology, primarily used for describing the human abilities for understanding each other – thus allowing for communicating and creating social links.

Human environments that follow such an architecture are commonly referred to as *smart spaces*. These spaces particularly embrace the recent development of rather distributed, integrated sensing, actuating and processing units. So-called pervasive technology opens for interaction at a variety of scales, thus not confined to the human physicality.

To another extent, the ubiquitous computing vision draws the idea of global and potentially exhaustive interconnection between things[1]. When describing his vision for further advances in the mundane integration of computing technologies, Mark Weiser already depicted in the early 90s computer-based networks that resemble the current tendency of such pervasive smart spaces [4].

More recently, Huijnen and colleagues implemented a smart home which includes a robotic companion [5]. In this system, the robot and the space are inter-operating consistently, leading to a perception of the coupling as a coherent whole. This highlights the fact that distributed systems can carry modular properties. Thus, even though the system is "exploded" within a space, at this local scale, ubiquitous systems such as described by Weiser can become a higher-level unit with a consistent identity.

1 In the sense developed by Tim Ingold in his essay *Bringing Things to Life* [3], blurring the line between objects and spaces.

Another example is a recent project by the PRIMA research team. They experimented with a space space, featuring a non-antropomorphic device as materialisation of a communication channel between the inhabitants and the space. The steerable camera-projector coupling was carrying strong communication qualities, while the rest of the space gathered various inferences on their inhabitants' behaviour through multi-modal data integration [6].

In these different examples, the multi-modal integration is necessary the higher-level coherence of these modular systems. Context-aware technologies propose to contribute to this issue by collapsing multi-modal information into multi-level analysis of human behaviour, implementing the situation models for human behaviours in programmable systems [6].

There is yet no generic mechanism for implementing context-aware applications. But recent advances pave the way to easily defining contextualisation, so that processing systems would be more straightforwardly understandable by human developers and users. This solution rely on the advances realised around the *Semantic Web* approach. Using its defined entries as a basis for context categorisation, an acceptable degree of identity between the users representations and the system models for understanding human behaviour might be reached [7][8]. An intelligent agent manipulating symbols, explicit representation of contextualised data, and able to understand human behaviour shall develop communication abilities with human agent on the basis of an adaptive common belief system.

III. A Human-Centered Artificial Environment

Smart spaces are increasingly studied, both theoretically and practically, with laboratory experimental spaces or experimental liveable spaces, allowing for longitudinal studies. Such studies are tackling several human-centered matters, often revolving around medical and ageing issues, but also addressed to general population concerns [9]. A few of them are questioning more specifically social issues.

Social dimensions of the living space are fundamental when it comes to fighting loneliness and remoteness, but are also inherent to the human use of space. However, the social aspect of space is most commonly studied in terms of mediating the social interactions of the inhabitants – or, more generally, users – of the space. As an example, this is what Streitz and colleagues refer to when they talk about a "social architectural space" [10]. Diverse fields may put a focus on this approach:

- If the field of gerontechnology[2], propositions are often revolving around the ability of the elderly to keep in touch with distant relatives or careworkers.
- More generally, in the fields of Computer-Mediated Communication (CMC) and Computer-Supported Collaborative Work (CSCW), links would be established between people through distant buildings, connected for example by permanent video streams.
- When focused on non-remote cooperation, CSCW researchers would seek to enhance human-to-human interaction through the use of multi-user systems.
- And without necessarily involving modern technology, the field of architecture has been commonly concerned by the making of spaces with specific social functions.

However, substantial development of theoretical frameworks and implementations are pushing further the possibilities of communication between human and smart spaces. It is likely that they could actually be considered as *actors* of a social interaction, and not merely *mediators* of human-to-human interactions. Negroponte, foreseeing the advent of such possibilities, introduced in *Soft Architecture Machines* the visionary metaphor of "[a] family with a new member in it - the house" [1].

IV. The Social Dimension of Smart Spaces

This social potentiality in the human-machine interaction has been mostly developed in the field of Social Robotics. It is then stated that a proto-relationship could grow between humans and robots on the basis of engagement through conversational interaction. Cynthia Breazeal insisted on the need for robots that we could interact with in "human terms" [11]. This belief, reinforced by recent development of conversational agents that would include stereotypical gestures and that could bear the test of a conversational tracking paradigm, seems to confine the social potentiality in human-robot interaction to humanoids systems [12]. However, Huijnen and colleagues have been highlighting a shift from this view, claiming that the "personnality" – to which their refer as *persona* – of the intelligent systems the subjects are interacting with could have more impact on long-term interactions than the physical materialisation of the system [5].

In his book, Negroponte envisioned similar social capabilities for architectural spaces, depicting with qualities related to social interaction, and giving credit to the possible establishment of a social relationship with their inhabitants. He attributes intentionality to what he calls a responsive system[3], making room for considering that the building carries persona. Giving the example of an elevator, as an illustration of possible forms of behaviour, he makes the following statement: "From this point it is possible to extrapolate and to fantasize to the extremes of a courteous elevator. In the same breath, we can wonder about the eventuality of its being grumpy, poking fun, or trying to befriend influential passengers by giving them more personal and efficient service" [1]. Accordingly, he depicts the possibility of an "intimate" interaction, that he correlates to the mutual ability to recognize the intentions of the other. While the conceptual framework of semantic spaces opens for such "intimate" interactions by insuring common representations in the way both actors interpret each other,

2 An interdisciplinary field focused on the use of technology for gerontological matters.

3 "In contrast, responsive, sometimes called adaptable, or reactive, means the environment is taking an active role, initiating to a greater or lesser degree changes as a result and function of complex or simple computations. […] Transposing a similar responsiveness to the physical environment suggests that it, too, must have purpose and intentions" [1]

Negroponte sees room for social interaction in the match between *my model of you* and *my model of your model of my model of you* [1]. This last view supports the possibility of social interaction between two entities that are embodied in radically different ways.

This idea of the primacy of persona on the embodiment when it comes to social interaction goes along with the observations made in the CompanionAble project[4]. Smart spaces, like robotic companions, could share intellectual – even thought artificial – properties with the humans they tend to imitate. They may only differ on one very point: their interface with the world, that is their body.

Their differences are of scale and of physical relationship to the human, but not necessarily ontological. While the antropomorphism of most robotic companions may help substantially the ease of social link between humans and machine [12][13], relationships of some kind may as well be established between a human and an architectural space. The process may of course be harder, but may not be critically affected by this bodily difference. As Negroponte frames it: “Consider the process we go through in getting to “know” somebody. You will remember stages of attempting to make no predictions, times of wrong second-guessing, and later periods of "knowing" him or her. This is dramatically amplified if the other person is from another culture, ill-versed in your language” [1].

V. Fear of Intrusion

Common objections that come with smart spaces are those of privacy, intrusiveness or obtrusiveness [14][15]. But as with relationships between human beings, such issues may be tackled by the mean of communication. Ideally, shall be shared the intentions that lead to perceptible initiatives or reactions [1] [6], as well as a feeling of the effective control each actor of the relationship has on the other – in practice, the range of action the adaptive system is able to initiate through a long-term relationship with the human agent [16]. While we may witness a technological progress in the clarity of such communication, we may simply question: would someone that does not wish to live with a new housemate, wish to live within a socially present smart house?

VI. Conclusion

Through this review of different perspectives on human relationships to non-human entities in their surroundings – more specifically architectural spaces –, we tried to highlight some directions of convergence. *Soft Architecture Machines* framed, back in the 70s, an original view on responsive spaces as potential actors of a relationship with their inhabitants. However, so far, different fields have been working on closely related issues without aggregating toward this idea. We believe that the interdisciplinary tendency of our time is likely to witness such a connection in the near future, especially with the development of living labs opening for the observation of long-term relational effects between smart spaces and their inhabitants. And maybe, then, an smart house might thus be qualified a smart home.

4 “Based on our empirical observations, it is argued that the robot persona, rather than the physical embodiment, is the most important determinant of the degree of users’ acceptance in terms of users’ perceived trustability and responsiveness of the robot and therefore their sense of enhanced usability and satisfaction with such personal assistive systems.” [5]

References

[1] Negroponte, N. (1975). Soft architecture machines. MIT press.

[2] Johnson-Laird, P. N. (2006). How we reason. Oxford University Press.

[3] Ingold, T. (2010). Bringing things back to life: Creative entanglements in a world of materials. ESRC National Centre for Research Methods, Manchester.

[4] Weiser, M. (1991). The computer for the 21st century. Scientific American, 265(3), 94–104.

[5] Huijnen, C., Badii, A., Heuvel, H. van den, Caleb-Solly, P., & Thiemert, D. (2011). “Maybe It Becomes a Buddy, But Do Not Call It a Robot” – Seamless Cooperation between Companion Robotics and Smart Homes. In D. V. Keyson, M. L. Maher, N. Streitz, A. Cheok, J. C. Augusto, R. Wichert, … B. J. A. Kröse (Eds.), Ambient Intelligence (pp. 324–329). Springer Berlin Heidelberg.

[6] Project-team PRIMA, Activity Report INRIA 2011. Retrieved 01/2016 from https://raweb.inria.fr/rapportsactivite/RA2011/prima/prima.pdf

[7] Wang, X., Dong, J. S., Chin, C. Y., Hettiarachchi, S. R., & Zhang, D. (2004). Semantic Space: an infrastructure for smart spaces. IEEE Pervasive Computing, 3(3), 32–39.

[8] Chen, H., Finin, T., Joshi, A., Kagal, L., Perich, F., & Chakraborty, D. (2004). Intelligent agents meet the semantic Web in smart spaces. IEEE Internet Computing, 8(6), 69–79.

[9] Demiris, G., Hensel, B. K., & others. (2008). Technologies for an aging society: a systematic review of “smart home” applications. Yearb Med Inform, 3, 33–40.

[10] Streitz, N., Prante, T., Röcker, C., Alphen, D. V., Magerkurth, C., Stenzel, R., & Plewe, D. A. (2003). Ambient Displays and Mobile eDevices for the Creation of Social Architectural Spaces. In K. O’Hara, M. Perry, E. Churchill, & D. Russell (Eds.), Public and Situated Displays (pp. 387–409). Springer Netherlands.

[11] Breazeal, C. L. (2004). Designing Sociable Robots. MIT Press.

[12] Sidner, C. L., Lee, C., Kidd, C. D., Lesh, N., & Rich, C. (2005). Explorations in engagement for humans and robots. Artificial Intelligence, 166(1), 140–164.

[13] Bailly, G., Elisei, F., & Raidt, S. (2009). Boucles de perception-action et interaction face-à-face. Revue française de linguistique appliquée, Vol. XIII(2), 121–131.

[14] Melenhorst, A.-S., Fisk, A. D., Mynatt, E. D., & Rogers, W. A. (2004). Potential Intrusiveness of Aware Home Technology: Perceptions of Older Adults. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 48(2), 266–270.

[15] Hensel, B. K., Demiris, G., & Courtney, K. L. (2006). Defining Obtrusiveness in Home Telehealth Technologies: A Conceptual Framework. Journal of the American Medical Informatics Association : JAMIA, 13(4), 428–431.

[16] Davidoff, S., Lee, M. K., Yiu, C., Zimmerman, J., & Dey, A. K. (2006). Principles of Smart Home Control. In P. Dourish & A. Friday (Eds.), UbiComp 2006: Ubiquitous Computing (pp. 19–34). Springer Berlin Heidelberg.

Social Robotics and Technology Acceptation

Kevin Parisot
Master Cognitive Sciences
Grenoble Institute of Technology - Phelma
Grenoble, France
kevin.parisot@phelma.grenoble-inp.fr

Alban Flachot
Master Cognitive Sciences
Grenoble Institute of Technology - Phelma
Grenoble, France
alban.flachot@phelma.grenoble-inp.fr

***Abstract*—In this paper the authors address the notion of technology acceptability on social robotics. A coverage of the theories, hypotheses and methodologies researched and deployed in that field are presented, analysed and discussed. The topics of Human Robot Interactions, the Uncanny Valley and Anthropomorphism are detailed. The authors propose a widened definition of technology acceptance that provides more flexibility and amplutide to evaluate social robotics and its emerging trends. An analysis of various application fields, including home, entertainement, healthcare and service industry robotics is given and conclusions on the key elements and challenges that will drive acceptation of social robotics are discussed.**

***Index Terms*—Social Robotics, Technology Acceptation, Uncanny Valley, Anthropomorphism, HRI.**

I. Introduction

Social robotics is a dynamic and surging research area that evolves through technological developement and the growth of knowledge around cognition. As many other new technologies, it faces challenges on acceptation, especially given the social nature of it. We start by introducing those two concepts and defining them in the context of our review and analysis.

A. Social robots

As commonly assumed, a social robot is an autonomous robot able to interact with another physical agent (in particular humans) following social behaviours and rules. Fong defines it as follows: "Social robots are embodied agents that are part of a heterogeneous group: a society of robots or humans. They are able to recognize each other and engage in social interactions, they possess histories (perceive and interpret the world in terms of their own experience), and they explicitly communicate with and learn from each other" [1]. A more general definition is given by Kahn et al. They define social robots "as robots that, to varying degrees, have some constellation of being personified, embodied, adaptive, and autonomous; and they can learn, communicate, use natural cues, and self-organize" [2]. A social robot shall thus be an independent physical entity with the ability, to some degrees, to move freely. This freedom makes it able to show some sort of behaviour and, along with the progresses in cognitive sciences and artificial intelligence, allows it to communicate or at least interact with others. Hegel [3] sums this all up by considering a social robot as a robot with a social interface, that being a composite of a context, a form and a function relevant for a socially involved activities and interactions, mainly with humans (Fig. 1). Such robots give rise to many questions and problems, and in particular, regarding what is the best "social interface" i.e. depending on the social context, the functions and form it should have to make its interaction with its users the easiest and the most adapted. This leads to the question of the acceptability of social robots.

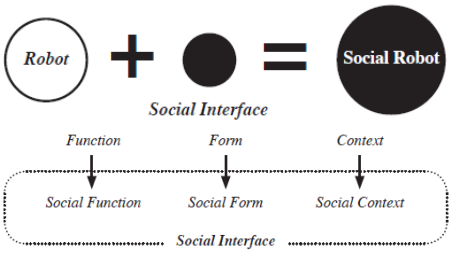


Fig. 1. Social interface differentiates the social robots from other robotics and is thus optimized [3]

B. Technology acceptation

Technology acceptation is a notion that encompasses the study, estimation and evaluation of a given technology, or set of integrated technologies, being more or less accepted by its users. In this narrow definition, two variables are considered as determinant: perceived usefulness and perceived ease of use [4]. These concepts have been studied by psychologists and decomposed in a self-efficacy theory, a cost-benefit paradigm and a channel disposition model for information system more generally. Other methodologies such as the Technology Acceptance Model (TAM) [5] have been widely cited and used to provide insights on users' appreciation of technologies being developed. Such approaches are attempts to measure in an objective manner the levels of short-term functional acceptation of a technology or a system. However, in the context of social robotics, given the potential similarities (anthropomorphism) and long-term relationships that can be developed, one should expand the definition of technology acceptation to cover challenges and issues that may arise from such phenomenons. Therefore, this paper introduces a three level definition of technology acceptation for social robotics, considering functionality, psychology and society.

II. Theories and hypotheses

A. Levels of technology acceptation

Technology acceptation can happen at different levels in terms of how much individuals accept a technology and what proportion of a population accepts it too. The authors of this paper aim to provide a more complete view of technology acceptation, than the ones usually presented and discussed, by synthesizing different notions and providing a scale or levels by which one can analyse and qualify a technology as globally accepted or not. This notion is obviously a gray scale with a dependency to many variables that combine the technology's maturity and capabilities, economics and market analysis, psychological and emotional attachment from its users, functional relevancy, and philosophical, ethical and regulatory acceptation at a societal level. All these elements fit in a vision that takes into account the space-time diffusion of the technology until it becomes pervasive. Thus three distinct levels of technology acceptation in the context of social robotics are defined:

1) Functional acceptation: where the technology, the design and its implementations are tested as relevant and cost efficient alternatives to a social problem. This level is being studied in many application fields of social robotics and requires developers to consider human-robot interactions (HRI), cost-value ratios, performances in terms of efficiency, stamina and other practical variables. Here, one has to think of the social robot in relation to the problem itself: does it solve the problem well enough? Is it worth developing and investing into robotics for this problem rather than leaving it to current human based methods? Will the robot integrate convincingly enough in the social context of the problem? Are the changes needed to implement the social robotics solution too numerous on the existing environment or practice? These are pragmatic and concrete questions that precede most technology enterprises. They have been addressed through the development of HRI design methodologies [6], [7], [8], [9], that help developers keep the features of the robot relevant to user needs. The Technology Acceptance Model (TAM) [5] can more generally be applied to social robotics too. Notions such as the "Uncanny Valley" [10] and "anthropomorphism" [11] can help guide the design process too.

2) Psychological acceptation: where the social robots are cognitively and emotionally accepted in the context of the problem they are being deployed on. This links to HRI but takes a wider and longer term view on the acceptation of robotics. Social robots are in their nature going to be interacting a lot more than traditional robots with humans and must adapt to some level to human expectations in social interactions. In a similar fashion that human to human interactions involve long term relationship building, with emotional and rational variables, one can project similar phenomenons to occur in long term human-robot relationships and thus this aspect needs to be studied and researched.

3) Societal acceptation: where a large community or a society accepts a technology due to its large penetration in markets, accessibility and availability. At this level, regulations and institutional controls are expected to be applied to the technology in question and follows philosophical and ethical debates. The technology is generally mature and cost efficient; however regulations apply to the form it takes and will constrain it. It is beyond the pioneering stages of research and development, and in a phase of market integration. Questions around the impact of social robotics on our culture, education, health, security, law and ethics become relevant as the technology can influence and impact most of the society's members' lives. The idea is to study how it has changed human society and human life, and whether some aspects of social robotics should be limited or banned following an abstract reasoning and empirical evidence of long term effects on humans.

We have expanded and structured technology acceptation in the above manner so as to facilitate our analyses of techniques and methods used for social robotics in Section Theory and Hypotheses and our analysis across application fields and sectors in the Section Application fields and Analysis. These three notions represent levels of acceptation that occur in different contexts of technology diffusion and ubiquity.

B. Human-Robot Interactions

Human-Robot Interactions (HRI) is an emerging interdisciplinary field that is preoccupied with the study of robotic systems in interaction with human beings. An extensive review of HRI was done by [7] and provides an overall view for all types of robotics in many application areas. HRI is composed of two general categories of interactions: remote and proximate, however, in this paper, we focus on social robotics which restrains the scope of HRI to mostly proximate interactions. HRI problems differ from the more establish human-computer interaction (HCI) field in the sense that a physical robotic entity acts as an agent in complex dynamic environments. HRI is defined as the process of collaborating towards the accomplishment of a goal between one or more humans and one or more robots. We review some of the challenges that arise from this notion in the light of social robotics and how they are necessary for functional acceptation.

1) Autonomy: Autonomy is a major aspect of robotics and can be a large constraint to HRI; for social and mobile robots, an interesting notion to evaluate the autonomy is that of Neglected Tolerance, which is the amount of time the robot can tolerate without being directly interacted with [12]. Social interactions are the focus of HRI, however, these are moments in which information is transferred and must be followed upon by the robot's capability to operate functional tasks when the human neglects it. A related notion is that of Level of Autonomy (LOA) of a social robot

that can characterize the extent of human involvement in the HRI, providing a human-centered aspect of autonomy. [13] provides a progressive scale that sets the LOA from ”human does it all” to ”computer decides everything and acts autonomously”. Implementation models of robotic autonomy are mostly inspired from control theory, artificial intelligence, signal processing, cognitive science and linguistics. For decision-making a common technique is to use the sense-plan-act model [14] though it has faced critics [15]. Another paradigm is the behavior-based robotics developed by Brooks and Arkins [16] where specific modules are created to handle autonomy and behavior [17], [18]. Hybrid architectures are possible as well [14] where high-level decisions and low-level reactions are combined. Probabilistic robotics is another approach that can enable autonomy for social robots. It allows the integration of multiple various sensors in fused variables thus creating social behaviors through sensor processing and reasoning algorithms. Examples of probabilistic robotics in localization and mapping are explored in [19], [20] and path planning in [21], [22], [23], [24]. A promising recent mathematical approach is the one of Bayesian programming [25] where uncertainty can be taken into account in probabilistic terms. Other examples provide insight in the rise of belief-desire-intention architectures [26], joint intention theory [27], affect-based computing [28], [29], [30] and temporal logic.

2) Information Exchange: Information exchange between robots and humans is an essential part of HRI for social robotics and different concepts are used to measure performance regarding this aspect of the interaction. Efficiency can be evaluated through accounting for the interaction time necessary to communicate instructions or intentions to the robot [12]. [31] also proposes to study the cognitive workload of an interaction and in [32], measurements of situation awareness related to the interaction are used to evaluate what level of common understanding exist between the actors of HRI. In the literature [7], two primary dimensions are proposed to characterize the direction of information exchange in HRI: the communications medium and the format of the communications. The format varies with the three modalities used for information exchange in robotics are vision, audition and haptic. Social robotics must thus take advantage of multimodal interfaces [33] to optimize information exchange and the associated workload, according to Wicken’s multiple resource theory [34]. Using these techniques aims at providing social robots with more natural communication protocols with humans and hence, reduce HRI learning by users. Therefore, taking into account these measurements in the design process helps identify and characterize the social interface needed to improve technology acceptability.

3) Team: Social robots are expected to interact with one or multiple humans and issues around team collaboration dynamics arise as a consequence of that purpose; this is by no means a trivial challenge. Depending on the context and the application field, different fundamental questions emerge around this notion, however, the most basic question around behavior in teams is the following: how many humans does it take to manage a set number of robots? The answer depends on the level of autonomy and information exchange methods of the robots and has yet to be extensively scientifically researched. One measurement proposed is the concept of fan-out that accounts for the number of independent and homogeneous robots that one human can manage [35], [36]. As of now, this notion and techniques associated to it remain limited [12]. Alternatively, for heterogeneous teams, performance of team cohesion in a HRI context can be measured using a combination of neglected tolerance and interaction times [37]. A key challenge in this challenge of HRI lays around the organizational and hierarchical dynamics with a classic problem around the determination of who has the authority and responsibility of decision making: the robot, the interface software or humans? It is necessary for developers and designers of social robots to consider where their product will fit in teams and whether their purpose is strategic, tactical or operational. Another issue that needs to be addressed by the research community is the following: how can conflict be resolved in this type of three agent cooperation models? These questions call for the execution of scientific studies that can help define a role for the social robot in teams so that HRI can be adequately modeled to meet functional and societal acceptation.

4) Adaptation, Learning and Training: The use of robots in social context requires different methods to train the agents for optimal cooperation. An unavoidable consequence is that robot operators will need to learn and adapt to the presence of robots with social capacities, similarly to what is needed whenever one introduces new technology in a given operational context. Minimizing operator training can be done through different techniques ranging from an instruction manual to instructions from a researcher or instructions from the robot itself [38]. To address this challenge, designers should look at common mental models that are implicated in different interaction modes [39] and look at cognitive sciences research, specifically social and emotional processes that are common to users [40]. Other simple techniques to train humans include the use of didactic videos, instructions in the interface and training programs. In educational and healthcare contexts, studies have been carried out for long-term interactions [41], [42], [43]. In the context of the service industry, several studies [44], [45], [46] provide insight on the mutual adaptation mechanisms that emerges from long-term HRI. Social robot designers should also be considered in terms of training though this point of view has been neglected and underestimated so far in the research community. However, some work such as Murphy’s workshops for help and rescue robots [47] and the application of ethnographic methods to HRI [48] provide a starting point. Given humans’ capacity to adapt, it is tempting to neglect

the necessity to provide learning and adaptation mechanisms to robot themselves however, this would be naive and would restrain the acceptance of social robots. Robot training can be done offline, in the lab [49], [50] but also online, especially for long-term interactions with humans [36], [51]. Learning capacities in robots provides solutions to increase social performances through adaptation of perceptual capabilities in order to make communication more efficient [36], [51], [52], improvements of reasoning and planning [53], [54] and improvements in autonomy [55]. Different methods exist to implement these capabilities in robots and can be done through learning by examples or demonstration, learning by tasks and skill learning.

5) Task shaping and framework: Task-shaping can be used to impact the performance in terms of HRI through the use of task analyses, cognitive work load analyses and ethnographic studies [48], [32]. Since robots tend to be implemented to relieve humans of tasks, these can be adapted to some extent to the robot's properties. However one should note that this type of change can act as a real break to the diffusion and adoption of technology, as discussed below in our application analysis. Finally, [7] points out that HRI still needs a unifying framework and standardization that would enable better cooperation between research and development teams working in the field of robotics. Addressing this challenge would enable better replicability of algorithms, mechanisms and processes, creating a growing ecosystem of communities working on the field of HRI and allowing progress to be achieved faster. Concerning social robotics, design toolkits are being proposed [9] based on the UTAUT model [56] that uses a questionnaire to help users evaluate many variables that qualify their interactions with a social robot.

C. Uncanny Valley

One of the main theoretical models addressing the duality of acceptability and social robots and tries to answer it, is the Uncanny Valley. This analysis was conducted by Japanese researcher Masahiro Mori [10] and states that the more life-like a social robot is (the more it mimics an agent actualy alive, like an animal or a human), the more believable and familiar it becomes to us, until ultimately it reaches a hypothetical maximum where a social robot would be indistinguishable from the living object it copies. As the robot becomes more life-like, Mori argues, based on psychological studies on anthropomorphism, that a sudden drop in the familiarity curve occurs (see Fig. 2). This model distinguishes two similar plots, one for agents being motionless and one for agents in movement i.e. one for the physical similarities and one for similarities in behaviour.
The general interpretation is that due to the superficial familiarity of a robot, one would not realize right away the artificiality of the robot one is interacting with and could then, after one does realize it, feel decieved with an uncanny and

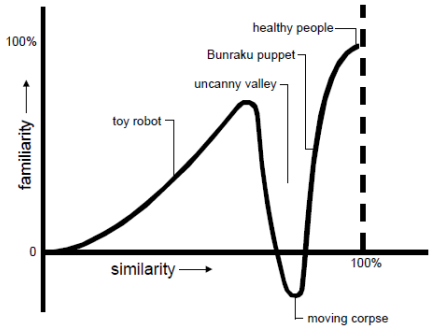


Fig. 2. The Uncanny Valley [58]

unpleasant feeling. This is referenced as "the zombie-effect" [57]. This idea is quite intuitive: to understand it, simply imagine that you are talking to a man with an arm prothesis so well made that there is no way for you to know it, until you shake hands with your interlocutor and feel the coldness of the metal. Or imagine you enter an empty bar and you start having a nice conversation with the barman (or barmaid), until due to its behaviour being somehow a little bit odd, you suddenly get aware you were actually enjoying the company of an artificial being all along.

D. Anthropomorphism

Anthropomorphism is a phenomenon whereby humans tend to associate human-like features and properties to objects, events, animals and other elements that are not human, in order to rationalize how they function and relate it to human mental states and physical capacities. Hence cognitive and emotional states are used to understand something that might not be able to have such states, however, it is a process that helps humans understand better their environment and the things they interact with. This definition is close to what Dennett [59] called "intentional stance", which he presents as a method to understand entities of the world and their behavior by thinking of them as rational agents with intentionality like humans.
This notion relates to design decisions on social robotics and human-robot interactions (HRI) whereby the engineers and designers have to consider this tendency in human, and thus user, behavior to apply such psychological mechanisms to understand the robot or information system they interact with. Duffy [11] describes anthropomorphism not as a "solution" but a potential "language" to facilitate interactions between man and machine. In a sense, from this view point, the social robot could aim to represent a goal of optimal form of human-computer interaction in general; the social robot appearance and its capacity to act and interact with flawless social codes that are very close to human to human social interaction would achieve the aim to have an interface that is undistinguishable for the users. However, various authors [11], [10] warn us that reproduction of human features defeats the point of social robotics. The target is not to create artificial humans or life,

but to create robots, with all the complimentary capacities they have, that can add value to human life.
Anthropomorphism in human robot social interaction can be very efficient when used to help convey information on the robot's internal state as a parallel to a human's internal states like emotions. Given that the face and eyes are the usual center of attention for interaction, there have been attempts to study what level of anthropomorphism is needed on social robot's faces. [11] sets it as a triangular trade-off problem with an extreme for faces that are Abstract, Human or Iconic (Fig. 3). [60] presents an experimental approach that identifies features that are important to the perception of human-ness in robot faces. [61], [62] discuss of the importance of eye contact and expressive faces in human robot interactions while [58] showcases the possibilities with visual iconic expressions and [63] portrays the effects of human-like faces in HRI. Iconic and functional designs such as Sparky [58] or Kismet [61] seem to be the most promising leads in terms of that trade-off. Issues are identified in [64] around the heavy computational and mechanical needs in the complexity of human-like faces and their actions for expressions, as well as current technologies' incapacity to reproduce these accurately, leading to a disappointment in regards to the users' expectations; a phenomenon that can be referred to as the "Uncanny Valley" [10].
Another aspect that is critical to the notion of anthropomorphic design is that of artificial sociability and more specifically the necessity for social robots to have communication methods that are close to human ones. A challenge is to incorporate a sense of emotional intelligence such as defined by Goleman [65] in robotic systems. Furthermore, Damasio [66] argues that emotionality is a key factor in social intelligence and is thus, important for the success of social robots' integration in human communities. These notions refer to the psychological level of technology acceptation presented above, whereby social robots need to be able to develop relationships using information and cues from emotions of users to interact adequately. However, just as with faces, designers must be careful not to be too anthropomorphic and should aim to reach a balance.
Anthropomorphism leads to a general conclusion: it is not about copying human features but about reaching a fine tuning of parameters that allow social robots to be complimentary in the social communities where developers aim to place them. [11] provides some key insight on elements that determine a good design methodology in terms of anthropomorphism. He recommends the incorporation of communication conventions, avoiding the "Uncanny Valley", using natural motion, balancing function and form, facilitating the emergence of the robot's singular identity as well as giving artificial emotions and autonomy to the social robots.

III. Application fields - Analysis

In this section we review the state of innovation for social robotics in different contexts and fields of application.

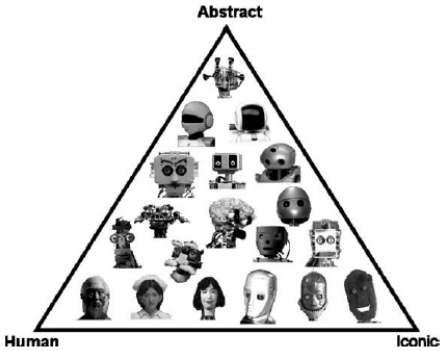


Fig. 3. Anthropomorphism design space for robot heads [11]

A. Home and consumer

1) Chores and house robots: Home robots reflect an age long fantasy in many cultures; the possibility of automating our daily house chores by the use of robots, thus freeing people's time for more stimulating activities. Household cleaners and lawn mowers are already available, however they fail to convince the masses and be accepted due to the necessity for users to modify and adapt radically the robot's environment - their home. Sung [67] explains that a majority of vacuum cleaner robot users have had to reorganize their home in order to use this technology. This process is often called the rationalisation of the robot's environment and is sometimes referred to "roombarization" [68] and represents an important break to user acceptation of the technology. Even though these are not social robots yet, they provide an interesting insight on how intense task-shaping (see Section Human-Robot Interaction) affects acceptability. [69] and [70] conclude that, given the history of technology research, users' interest decrease when the automation of a practice requires too many changes to the existing environment or practice.

2) Amusement robots: Amusement robots do not fit a concrete or functional need in our society but derive from the entertainment industry and has large potential as a consumer good. In this case, the interactions are crucial to the success of amusement robots as they have to reach a balanced and fine tuned level of anthropomorphism with sufficient complexity so as to not be quickly discarded as temporary gadgets [69], [71]. Animal-like robots such as AIBO, Furby and My Keepon are being invested in, as research has shown [72] that young children are sensitive to such items and it represents an evolution of the toy market in a way. But it is also the sex robot that has an important market potential [73] and which drives a lot of development effort. Although these examples seemingly interact mostly through physical contact with humans, it is essential that they use social intelligence to create relationships and bonds with their users [1].
An interesting example is the following: Sparky [58] is a small robot about 60cm long, 50cm high and 35cm wide. It has an expressive face (Fig. 4), a movable head on a long neck, a set

of moving plates on its back and wheels for translating around the room. Even though Sparky was partly remotly controlled by the experimentalists, espacially when it needed a adequate facial expression responce, there was no way the subjects were able to know this fact. The subjects, being children or adults, were placed in the presence of Sparky in the lab or a public venue. Most of them enjoyed interacting with it, treating it like a child or a pet and reported their experience as pleasant. Children were particularly responsive, full of attention and playing with it. The interesting point of this study is the relative simplicity of Sparky's body, behaviour and social interactions. It showed a very "robot-like" body, had a small panel of facial/emotional expressions, was on wheels and could only make vocalisations, but no speech. Despite all these charateristics, and perhaps given the HRI designed, Sparky gave succesful results. In reference to anthropomorphism and the "Uncanny Valley", one can conclude that iconic and subjective corporal representations can even be preferable in this context. The authors' suggestions for further improvement are indeed congruent with these observations as they focus not on the visual aspects of Sparky, or its movement complexity, which they find sufficient, but rather on its autonomy and sensory abilities (like being able to sense the external agent touching its body in a particular point and react accordingly). Hence, it is such social robots' artificial cognitive and emotional capabilities that will determine their success regarding functional and psychological levels of acceptation. However, on what is defined previously as societal acceptation, major potential and speculative issues arise and are reported in [69]. Sharkey and Sharkey [74] raise some concerns around the impact on emotional development of children as they grow up and encounter less authentic social interactions and thus, can miss out on a lot of learning experiences for social skills development [75]. Social robots providing heavy anthropomorphism will generate confusion for these children, especially in the context of "nanny" robots. Another anticipated issue is around de-socialisation of the society [76] as people will be able to get entertainment from artificial beings rather than other people's company. Though research is being done towards improving HRI in this context [40], [77], very little studies have been done to predict or model possible long term consequences on individuals and communities of such amusement robot pervasion. Furthermore, the sex robot will necessitate ethical and regulatory discussions to resolve issues around mechanization of sex, unfaithfulness with sex robots and the use of robots that take the appearance of children - whether it encourages paedophilia or can be used as a therapy.

B. Health care

When writing about social robots and their acceptance in our society, one cannot forget to talk about their application in health care and in the rehabilitation of autistic children in particular. In these specific cases indeed, HRI have proven to be even more accepted than human-human interactions, due to the simplicity of these interactions. To put it shortly, Autism

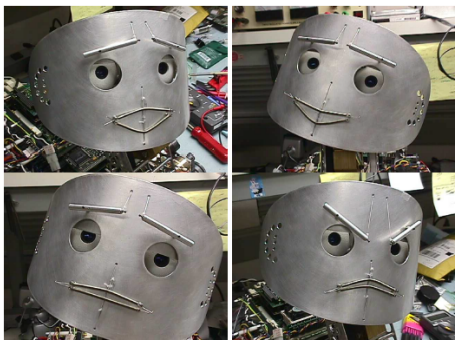


Fig. 4. Range of Sparky's facial expressions: surprise, happiness, sadness and anger [58]

Spectrum Disorder (ASD) can have many expressions, which makes it difficult to precisely charecterize and all the more to cure. Yet, its impairment can still be broadly divided into three parts [78]:

- Social relationship/interaction: children with ASD lack of the ability to make eye contact, to interpret others' feelings, to read facial expressions and the tone of voice which makes the interaction with others problematic and tend to isolate themselves [79], [80].
- Social communication: speech may be completely absent or inappropriate in children with ASD [80] which contributes to their lack of understanding of other's people use of it [79].
- Imagination: children with ASD lack imagination and abstraction capabilities. This makes it difficult for them to apprehend the complexity of the outside world and results in a tendancy to narrow their interests and their activities to build a world that makes sense to them [80], [81]. A change in their routines often leads to a profond distress and anxiety [79].

For these reasons, a much simpler social environment than those involved in human-human interactions are convenient and more attractive for children with ASD and can be the basis for more complex sort of interactions. Social robots have shown promising results in their capacity to teach some basic aspects of human-like social behaviour to children with ASD, or simply being a companion with whom it is easier to intaract. An example is given by [82] where a minimally expressive robot was used to teach a child with ASD a small set of facial expressions of emotions. It had the great benefit of interacting in a simple way with the child, without any sensory overload as it can be the case wiht humans constantly changing facial expressions. An extensive list of experiments and social robots examples involved in children with ASD therapies can be found in [78] or on the AuRoRa website [83].

C. Service sector applications

Social robots have the potential to be introduced in the service sector workspace and become employees of

companies and institutions that interact with the consumers or the public. The service sector industry is based on social interactions between service providers and consumers, thus the social robots represent an impactful evolution of robotics with a potential for automation of some of the work, given a cost-benefit threshold is passed, making the investment viable. However, though some prototypes are being tested in the labs, the technology is still being tested against functional acceptation of the public; many challenges need to be solved, specifically in the robots' approach to humans to start an interaction [84], [85] and understanding conversational dynamics so as not to interrupt at the wrong time. An interesting study around workflow impact has been conducted in hospitals [86] and shows that depending on the service unit and the pre-existing work conditions and environment, social robots can be welcomed or rejected. Emotional states of workers affect their judgement and acceptation of new technologies in this context: it is reported that in positive situations (for example, births) acceptation scores are higher while in negative situations (for example, cancer patients) robots are deemed "annoying". Overall, in the context of the workplace, social robotics is still struggling to meet functional acceptation, but once it does, new challenges will be posed around long-term social interactions and psychological acceptation. Furthermore, given the external-facing nature of the roles they will be implemented on, social robotics will meet contestation on a societal level and human society will have to progressively reorganize itself so as to make sure that to the people it replaces, perceive it as a progress.

IV. Discussion

A. Influence of cultures

The acceptance of social robots is also partly a consequence of cultural factors. As stressed by [87] there are large differences between Western Countries and Japan in this matter. Some tend to explain this opposition with fundamental cultural basis differences like religion [88]: while the monotheist religions in the west emphasise the link of humans and their god (the Man being superior to the others living creatures with no souls), the Japanese Shintoism states that all animals, objects and people share common "spirits" and shall live in harmony [89]. No wonder then how in the first case robots in general are considered fundamentally different from us and therefore can be indifferent to our survival and be a threat, while in the second case the Artificial's interests are considered the same as the Living's. This has been particularly represented in popular cultures like films and comics, where until recent times robots were often depicted as possible threats in mainstream films [6], [88] in Western countries while in Japan they were not. A shift however is nowadays observable, as mainstream films are more often showing social robots as good companions or friends or even heroes: one can think of Wall-E, Big Hero 6 or Transformers. But as the interaction between popular cultures and societal vision of the world is reciprocal, we are confident in the idea that a slow acceptance of artificial beings like social robots is taking place in our society.

B. Prematurity of social robots

Overall robotics is a booming research topic with staggering progress and innovation being developed every year. It is, however, as with many trending technology fields, often overestimated and expectations are set at a high point by the public, the industries and institutions. At the time of writing, concerning social robots, one can observe that though spectacular feats have been achieved in sensors, mechanics, miniaturization, algorithms and other technical aspects of robotics, the field still needs to improve integration of these bio-inspired technologies. This state of affairs has an important impact on the technology acceptability of social robotics: most examples and prototypes are looking at meeting functional acceptability (for example, Aibo, Autom, Paro and Robovie [90]). As a consequence, only a few studies have been addressing psychological and societal acceptability [90], [69], [91]. To compensate this lack of rigorous research on long-term perspectives, the community has relied on intuitive but unproven concepts such as the "Uncanny Valley" for example. However, we see the emergence of HRI as an interesting factor that is likely to bring more interdisciplinary work in robotics, through the involvement of psychologists, cognitive scientists and social scientists.

C. Fine tuning and cognition

Throughout our analyses of theoretical approaches and methods and their applications, a common conclusion has been that social robotics and its acceptation is a matter of fine tuning and balance in the design decisions around the technology. HRI and anthropomorphism research show that successful and functionally accepted solutions do not lay in extremes but rather in finding an equilibrium that reflects an adaptation of robotic technology to human characteristics and means of communication, and the functional efficiency and optimality. Though the challenge is appealing to many engineers, the aim is not to replicate artificial humans, the ambition is rather centered in providing humanoid and socially performant tools that can add value and ease human life. Although its appearances might suggest the contrary, the humanoid or lifelike robot remains a tool. Growth of knowledge and research in cognitive sciences is essential for the process and will have a pivotal role in the acceptation of social robots. In the context of social robotics development, humans are the model that act as the inspiration and direction. By better understanding social interactions between humans, researchers will be able to implement better social robots. However, the emergence of sophisticated and social tools such as the one discussed and presented in this paper also gives the opportunity to study cognitive sciences differently [92]. Studies of HRI provide insightful notions of human sociability: thus social robots depend on cognitive sciences

but the relationship is reciprocal too. Thus, we anticipate that these fields will have mutually beneficial collaborations in the near future.

D. Fears and challenges in technology acceptation

Social robotics remains a sensitive subject in the eye of the public as their social aspect means that its products will be applied to contexts that are in the public space and their presence will be relatively imposed on many. Therefore, many fears are associated with this perspective, as with many society changing technologies. For social robots reach higher level of acceptation, the research and development community will need to address those fears by rationally explaining what social robots are, and what they are not. Intentional stance and anthropomorphism can lead to confusion on the robots' capabilities and cognitive properties. [69] has pointed some interesting ethical and philosophical issues that might arise as a consequence of societal acceptation of social robots, especially concerning lifelike appearance of robots and their dehumanizing potential. Institutions and governance are robust solutions that will help control and avoid undesirable drifts. One can also note that projects are emerging in more mature robotic applications like autonomous cars such as the European Field Operational Test on Active Safety Systems (EuroFOT) and Adaptive Integrated Driver-Vehicule InterfacE (AIDE) [69]. Such an oversight process can be expected to be applied to social robotics in the medium to long term future.

V. Conclusion

In this paper we have definied and presented social robotics in the eye of an extended definition of technology acceptation. Methodologies and concepts that will facilitate acceptation have been discussed and reviewed, namely HRI, Anthorpomorphism and the Uncanny Valley. An analysis over various application fields was conducted and reported. We concluded that enabling factors and challenges for social robotics acceptation are related to culture, the maturity of the technology, the wealth of knowledge in cognitive sciences and addressing fears around the topic.

We finish by reminding the reader of LaPiere's Attitude vs. Action [93]: even though humans tend to apprehend change and unknown innovations, once a certain level of maturity and perversiveness of the technology has been passed, humans accept the change.

References

[1] K. Fong, T., Nourbakhsh, I., & Dautenhahn, "A Survey of Socially Interactive Robots : Concepts , Design , and Applications Terrence Fong , Illah Nourbakhsh , and Kerstin Dautenhahn," *Robotics and autonomous systems*, vol. 42, no. 3-4, pp. 143–166, 2003.

[2] P. H. Kahn, Jr., B. Friedman, D. R. Pérez-Granados, and N. G. Freier, "Robotic pets in the lives of preschool children," *Interaction Studies*, vol. 7, pp. 405–436, 2006.

[3] F. Hegel, C. Muhl, B. Wrede, M. Hielscher-Fastabend, and G. Sagerer, "Understanding Social Robots," *The Second International Conferences on Advances in Computer-Human Interactions (ACHI)*, no. Section II, pp. 169—-174, 2009.

[4] F. D. Davis, "Information Technology Introduction," vol. 13, no. 3, pp. 319–340, 1989.

[5] D. F. V., Vekantes, V, Morris, M, Davis G.,, Davis, G., "TECHNOLOGY ACCEPTANCE MODEL - Research Front Map - Science ... Page 2 of 7," pp. 1–7, 2009.

[6] C. Bartneck and J. Forlizzi, "A design-centred framework for social human-robot interaction," *RO-MAN 2004. 13th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (IEEE Catalog No.04TH8759)*, pp. 591–594, 2004. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1374827

[7] M. a. Goodrich and A. C. Schultz, "Human-Robot Interaction: A Survey," *Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction*, vol. 1, no. 3, pp. 203–275, 2007.

[8] A. Steinfeld, T. Fong, and D. Kaber, "Common metrics for human-robot interaction," ... *on Human-robot* ..., 2006. [Online]. Available: http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1121249

[9] M. Heerink, B. Kröse, V. Evers, and B. Wielinga, "Measuring acceptance of an assistive social robot: a suggested toolkit," 2003.

[10] M. Mori, K. F. MacDorman, and N. Kageki, "The uncanny valley," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 19, no. 2, pp. 98–100, 2012.

[11] B. R. Duffy, "Anthropomorphism and the social robot," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 42, no. 3-4, pp. 177–190, 2003. [Online]. Available: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921889002003743

[12] J. W. Crandall, M. a. Goodrich, D. R. Olsen, and C. W. Nielsen, "Validating human-robot interaction schemes in multitasking environments," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A:Systems and Humans.*, vol. 35, no. 4, pp. 438–449, 2005.

[13] T. B. Sheridan and W. L. Verplank, "Human and computer control of undersea teleoperators," DTIC Document, Tech. Rep., 1978.

[14] R. Murphy, *Introduction to AI robotics*. MIT press, 2000.

[15] R. Brooks, "A. 1991. Intelligence without Reason," *Artificial Intelligence*, vol. 47, no. 1-3, pp. 139–159, 1991.

[16] R. C. Arkin, *Behavior-based robotics*. MIT press, 1998.

[17] R. A. Brooks, *Cambrian intelligence: the early history of the new AI*, vol. 97.

[18] R. Brooks *et al.*, "A robust layered control system for a mobile robot," *Robotics and Automation, IEEE Journal of*, vol. 2, no. 1, pp. 14–23, 1986.

[19] K. Konolige, "Large-scale map-making," pp. 457–463, 2004. [Online]. Available: http://www.aaai.org/Papers/AAAI/2004/AAAI04-073.pdf

[20] S. Thrun, "Learning metric-topological maps for indoor mobile robot navigation," *Artificial Intelligence*, vol. 99, no. 1, pp. 21–71, 1998. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0004370297000787

[21] R. G. Simmons, A. Bruce, D. Goldberg, A. Goode, M. Montemerlo, N. Roy, B. Sellner, C. Urmson, A. C. Schultz, W. Adams, M. D. Bugajska, M. MacMahon, J. Mink, D. Perzanowski, S. Rosenthal, S. Thomas, I. Horswill, R. Zubek, D. Kortenkamp, B. Wolfe, T. Milam, and B. A. Maxwell, "GRACE and GEORGE: Autonomous Robots for the AAAI Robot Challenge." *AAAI Mobile Robot Competition 2003, Papers from the AAAI Workshop*, vol. WS-03-01, 2003.

[22] H. Surmann, A. Nüchter, and J. Hertzberg, "An autonomous mobile robot with a 3D laser range finder for 3D exploration and digitalization of indoor environments," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 45, no. 3-4, pp. 181–198, 2003.

[23] S. Thrun, "Probabilistic Algorithms and the Interactive Museum Tour-Guide Robot Minerva," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 19, no. 11, pp. 972–999, 2000.

[24] S. Thrun, S. Thayer, W. Whittaker, C. Baker, W. Burgard, D. Ferguson, D. Hahnel, M. Montemerlo, A. Morris, Z. Omohundro, C. Reverte, and W. Whittaker, "Autonomous exploration and mapping of abandoned mines: Software architecture of an autonomous robotic system," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 11, no. 4, pp. 79–91, 2004.

[25] J. Diard, P. Bessiere, and E. Mazer, "A survey of probabilistic models using the bayesian programming methodology as a unifying framework," in –, 2003, p. x.

[26] M. J. Wooldridge, *Reasoning about rational agents*. MIT press, 2000.

[27] P. R. Cohen and H. J. Levesque, "Teamwork," *Nous*, pp. 487–512, 1991.

[28] C. Breazeal, "Emotion and sociable humanoid robots," *International Journal of Human Computer Studies*, vol. 59, no. 1-2, pp. 119–155, 2003.

[29] L. E. Parker, "ALLIANCE: An architecture for fault tolerant, cooperative control of heterogeneous mobile robots," *Intelligent Robots and Systems' 94.'Advanced Robotic Systems and the Real*

World', IROS'94. Proceedings of the IEEE/RSJ/GI International Conference on, vol. 2, pp. 776–783, 1994. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=407550

[30] R. W. Picard, "Affective Computing," *MIT press*, no. 321, pp. 1–16, 1995.

[31] T. B. Sheridan, *Humans and automation: System design and research issues*. John Wiley & Sons, Inc., 2002.

[32] M. R. Endsley, *Designing for situation awareness: An approach to user-centered design*. CRC Press, 2011.

[33] D. Perzanowski, A. C. Schultz, W. Adams, E. Marsh, and M. Bugajska, "Applications : Robotics Building a Multimodal Human – Robot Interface," *IEEE Intelligent Systems*, vol. 16.

[34] C. D. Wickens and J. G. Hollands, "Engineering Psychology and Human Performance," pp. 305–330, 1999.

[35] D. R. Olsen and M. a. Goodrich, "Metrics for evaluating human-robot interactions," *Proceedings of PERMIS*, vol. 2003, no. 4, pp. 507–527, 2003.

[36] J. D. Olsen and W. Sb, "Fan-out: measuring human control of multiple robots," *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in Computing System*, vol. 6, no. 1, pp. 231–238, 2004. [Online]. Available: http://dl.acm.org/citation.cfm?id=985722

[37] J. W. Crandall, C. W. Nielsen, and M. A. Goodrich, "Towards predicting robot team performance," *Systems, Man and Cybernetics, 2003. IEEE International Conference on*, vol. 1, pp. 906–911 vol.1, 2003.

[38] C. L. Sidner, C. L. Sidner, C. D. Kidd, C. D. Kidd, C. Lee, C. Lee, N. Lesh, and N. Lesh, "Where to look: a study of human-robot engagement," *Proceedings of the 9th international conference on Intelligent user interfaces*, pp. 78–84, 2004. [Online]. Available: http://portal.acm.org/citation.cfm?id=964442.964458&type=series

[39] J. W. Crandall, M. Goodrich *et al.*, "Characterizing efficiency of human robot interaction: A case study of shared-control teleoperation," in *Intelligent Robots and Systems, 2002. IEEE/RSJ International Conference on*, vol. 2. IEEE, 2002, pp. 1290–1295.

[40] C. Breazeal, "Toward sociable robots," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 42, pp. 167–175, 2003.

[41] T. Kanda, T. Hirano, D. Eaton, and H. Ishiguro, "Interactive Robots as Social Partners and Peer Tutors for Children: A Field Trial," *Human-Computer Interaction*, vol. 19, no. 1, pp. 61–84, 2004.

[42] B. Robins, K. Dautenhahn, and R. T. Boekhorst, "Effects of repeated exposure to a humanoid robot on children with autism," *Designing a More ...*, no. March, pp. 22–24, 2004.

[43] I. Werry, K. Dautenhahn, B. Ogden, and W. Harwin, "Can social interaction skills be taught by a social agent? The role of a robotic mediator in autism therapy," *Cognitive Technology: Instruments of Mind*, vol. 2117, pp. 57–74, 2001. [Online]. Available: http://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-44617-6_6

[44] B. De Ruyter, P. Saini, P. Markopoulos, and A. Van Breemen, "Assessing the effects of building social intelligence in a robotic interface for the home," *Interacting with Computers*, vol. 17, pp. 522–541, 2005.

[45] H. Hüttenrauch and K. S. Eklundh, "Fetch-and-carry with cero: observations from a long-term user study with a service robot," in *Robot and Human Interactive Communication, 2002. Proceedings. 11th IEEE International Workshop on*. IEEE, 2002, pp. 158–163.

[46] K. Severinson-Eklundh, A. Green, and H. Hüttenrauch, "Social and collaborative aspects of interaction with a service robot," *Robotics and Autonomous systems*, vol. 42, no. 3, pp. 223–234, 2003.

[47] R. R. Murphy, "National science foundation summer field institute for rescue robots for research and response (R4)," *AI Magazine*, vol. 25, no. 2, pp. 133–136, 2004. [Online]. Available: http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-3142713033&partnerID=tZOtx3y1

[48] W. J. Clancey, "Field Science Ethnography: Methods for Systematic Observation on an Arctic Expedition," *Field Methods*, vol. 13, no. August 2001, pp. 223–243, 2001.

[49] O. Brock, A. Fagg, R. Grupen, R. Platt, M. Rosenstein, and J. Sweeney, "Intelligent Humanoid Robots," *International Journal of Humanoid Robotics*, vol. 2, no. 3, pp. 301–336, 2005. [Online]. Available: http://www.worldscinet.com/abstract?id=pii:S0219843605000491

[50] M. Nicolescu and M. Mataric, "Learning and interacting in human-robot domains," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, vol. 31, no. 5, pp. 419–430, 2001.

[51] D. K. Roy, "Learning visually grounded words and syntax for a scene description task," *Computer Speech and Language*, vol. 16, no. 3-4, pp. 353–385, 2002.

[52] Z. Z. Bien and H.-E. Lee, "Effective learning system techniques for human–robot interaction in service environment," *Knowledge-Based Systems*, vol. 20, no. 5, pp. 439–456, 2007.

[53] C. Breazeal, G. Hoffman, and A. Lockerd, "Teaching and working with robots as a collaboration," in *Proceedings of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems-Volume 3*. IEEE Computer Society, 2004, pp. 1030–1037.

[54] J. G. Trafton, A. C. Schultz, D. Perznowski, M. D. Bugajska, W. Adams, N. L. Cassimatis, and D. P. Brock, "Children and robots learning to play hide and seek," in *Proceedings of the 1st ACM SIGCHI/SIGART conference on Human-robot interaction*. ACM, 2006, pp. 242–249.

[55] J. Saunders, C. L. Nehaniv, and K. Dautenhahn, "Using Self-Imitation to Direct Learning," *Robot and Human Interactive Communication, 2006. ROMAN 2006. The 15th IEEE International Symposium on*, pp. 244–250, 2006.

[56] V. Venkatesh, M. G. Morris, G. B. Davis, and F. D. Davis, "User acceptance of information technology: Toward a unified view," *MIS quarterly*, pp. 425–478, 2003.

[57] K. Dautenhahn, "Design spaces and niche spaces of believable social robots," pp. 192–197, 2002.

[58] M. Scheeff, J. Pinto, K. Rahardja, S. Snibbe, and R. Tow, "Experiences with sparky, a social robot," in *Socially Intelligent Agents*. Springer, 2002, pp. 173–180.

[59] D. C. Dennett, *Kinds of minds: Toward an understanding of consciousness*. Basic Books, 2008.

[60] C. F. DiSalvo, F. Gemperle, J. Forlizzi, and S. Kiesler, "All robots are not created equal: the design and perception of humanoid robot heads," *Conference on Designing interactive systems processes practices methods and techniques*, vol. pages, pp. 321–326, 2002. [Online]. Available: http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=778712.778756

[61] C. Breazeal, "Sociable machines: Expressive social exchange between humans and robots," *Expressive Social Exchange Between Humans and Robots*, p. 264, 2000. [Online]. Available: http://groups.csail.mit.edu/lbr/mars/pubs/phd.pdf

[62] A. Cozzi, M. Flickner, J. Mao, and S. Vaithyanathan, "A comparison of classifiers for real-time eye detection," in *Artificial Neural Networks—ICANN 2001*. Springer, 2001, pp. 993–999.

[63] D. Hanson, "Exploring the aesthetic range for humanoid robots," *Proceedings of the ICCS/CogSci-2006 long symposium: Toward social mechanisms of android science*, pp. 39–42, 2006.

[64] D. C. Dryer, "Getting personal with computers: How to design personalities for agents," *Applied Artificial Intelligence*, vol. 13, no. 3, pp. 273–295, 1999.

[65] D. Goleman, *Emotional intelligence*. Bantam, 2006.

[66] A. Damasio, *Descartes' error: Emotion, reason and the human brain*. Random House, 2008.

[67] J. Sung, R. Grinter, H. Christensen, and L. Guo, "Housewives or technophiles?: understanding domestic robot owners," *on Human robot*, pp. 129–136, 2008. [Online]. Available: http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1349840

[68] J.-y. Sung, L. Guo, R. E. Grinter, and H. I. Christensen, ""My Roomba Is Rambo": Intimate Home Appliances," *Ubiquitous Computing*, pp. 145–162, 2007.

[69] L. Royakkers and R. van Est, "A Literature Review on New Robotics: Automation from Love to War," *International Journal of Social Robotics*, pp. 549–570, 2015. [Online]. Available: http://link.springer.com/10.1007/s12369-015-0295-x

[70] R. Oldenziel, A. A. de la Bruhèze, and O. De Wit, "Europe's mediation junction: technology and consumer society in the 20th century," *History and Technology*, vol. 21, no. 1, pp. 107–139, 2005.

[71] G. F. Melson, P. H. Kahn, A. M. Beck, and B. Friedman, "Robotic pets in human lives: Implications for the human - Animal bond and for human relationships with personified technologies," *Journal of Social Issues*, vol. 65, no. 3, pp. 545–567, 2009.

[72] F. Tanaka, A. Cicourel, and J. R. Movellan, "Socialization between toddlers and robots at an early childhood education center," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 104, no. 46, pp. 17 954–17 958, 2007.

[73] R. Maines, "Love + Sex with Robots: The Evoluiton of Human-Robot Relationships," *IEEE Technology and Society Magazine*, pp. 10–12, 2008.

[74] A. Sharkey and N. Sharkey, "Granny and the robots: Ethical issues in robot care for the elderly," *Ethics and Information Technology*, vol. 14, no. 1, pp. 27–40, 2012.

[75] F. Tanaka and T. Kimura, "The use of robots in early education: A scenario based on ethical consideration," *Proceedings - IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 558–560, 2009.

[76] S. Turkle, "Alone Together," *New York Magazine*, p. 384, 2011. [Online]. Available: http://www.amazon.co.uk/Alone-Together-Sherry-Turkle/dp/0465010210

[77] B. R. Duffy, "Fundamental Issues in Social Robotics," *International Review of Information Ethics (IRIE)*, vol. 6, no. March 2003, pp. 31–36, 2006.

[78] J. J. Cabibihan, H. Javed, M. Ang, and S. M. Aljunied, "Why Robots? A Survey on the Roles and Benefits of Social Robots in the Therapy of Children with Autism," *International Journal of Social Robotics*, vol. 5, no. 4, pp. 593–618, 2013.

[79] A. Cashin and P. Barker, "The triad of impairment in autism revisited," *Journal of Child and Adolescent Psychiatric Nursing*, vol. 22, no. 4, pp. 189–193, 2009.

[80] (2013, 1). [Online]. Available: http://www.brookdalecare.co.uk/what-is-autismtriad

[81] K. Wall, *Autism and early years practice*. Sage Publications, 2009.

[82] B. Robins, K. Dautenhahn, and P. Dickerson, "From isolation to communication: A case study evaluation of robot assisted play for children with autism with a minimally expressive humanoid robot," *Proceedings of the 2nd International Conferences on Advances in Computer-Human Interactions, ACHI 2009*, pp. 205–211, 2009.

[83] (2016). [Online]. Available: http://homepages.herts.ac.uk/ comqbr/aurora/index.php

[84] K. Dautenhahn, M. Walters, S. Woods, K. L. Koay, C. L. Nehaniv, A. Sisbot, R. Alami, T. Siméon, C. Lane, and E. A. Sisbot, "How may I serve you ? A robot companion approaching a seated person in a helping context," *Human-Robot Interaction*, no. April 2005, p. 172, 2006.

[85] M. L. Walters, K. Dautenhahn, R. Te Boekhorst, K. L. Koay, C. Kaouri, S. Woods, C. Nehaniv, D. Lee, and I. Werry, "The influence of subjects' personality traits on personal spatial zones in a human-robot interaction experiment," *Proceedings - IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, vol. 2005, pp. 347–352, 2005.

[86] J. Forlizzi, "Robots in Organizations : The Role of Workflow , Social , and Environmental Factors in Human- Robot Interaction Robots in Organizations : The Role of Workflow , Social ,," pp. 287–294, 2008.

[87] C. Mims, "Why japanese love robots (and americans fear them)," 10 2010. [Online]. Available: http://www.technologyreview.com/view/421187/why-japanese-love-robots-and-americans-fear-them/

[88] H. Knight, "How Humans Respond to Robots : Building Public Policy through Good Design," no. July, 2014. [Online]. Available: http://www.brookings.edu/ /media/Research/Files/Reports/2014/07/29 how humans respond to robots knight/HumanRobot PartnershipsR2.pdf

[89] N. Kitano, "Animism, rinri, modernization; the base of japanese robotics," in *ICRA*, vol. 7, 2007, pp. 10–14.

[90] I. Leite, C. Martinho, and A. Paiva, "Social Robots for Long-Term Interaction: A Survey," *International Journal of Social Robotics*, vol. 5, no. 2, pp. 291–308, 2013. [Online]. Available: http://link.springer.com/10.1007/s12369-013-0178-y

[91] T. Nomura, "Influences of Concerns toward Emotional Interaction into Social Acceptability of Robots," pp. 231–232, 2009.

[92] T. Chaminade and G. Cheng, "Social cognitive neuroscience and humanoid robotics," *Journal of Physiology Paris*, vol. 103, no. 3-5, pp. 286–295, 2009. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1016/j.jphysparis.2009.08.011

[93] R. T. LaPiere, "Attitudes vs. Actions," *Social Forces,*, vol. 13, no. 2, pp. 230–237, 1934.

Compliance is the new key word for biomimetic robots

Damien SCHNEBELEN
Engineering Student in Cognitive Sciences
Grenoble Institute of Technology - Phelma
Grenoble, France
damien.schnebelen@gmail.com

Sélène PETIT
Masters Student in Cognitive Sciences
Grenoble Institute of Technology - Phelma
Grenoble, France
selene.petit@gmail.com

***Abstract*— In the growing field of robotics, increased performance and safety are the key to design better robots. In the industrial field, where the environment is strictly controlled, robots are now skilled operators that reproduce human behavior in assembling object pieces. In the social robotics field, they must be absolutely safe and act naturally in a non-predictable environment. Then what do these two types of robots have in common? First, it is interesting to design them as biomimetic, i.e. they mimic human behavior. Second, for both these robots the notion of compliance has been developed. Compliance is the ability for a robot to adapt its actions when receiving external forces from its environment. In this article we first discuss the importance of compliance for biomimetic robots in the industrial field, showing that compliance can be achieved at different levels of the robot's implementation. In a second part, we assess the importance of compliance in social robots, designed to interact daily with humans. Some of the force control devices as well as the materials used to create such robots are described.**

Keywords—compliance; biomimetic; human-robot interaction;

I. Introduction

With the emergence of new technologies, robots are on the brink of being involved in a significant part of everyday life. Within this field of robotics, one particular kind of robots is revealing a huge potential: the biomimetic robots. By definition, these biologically-inspired robots have to reproduce a living being behaviour (defined as a model) while taking into account its interaction with its direct environment. In order to fit with these expectations, one criterion, called robotic compliance, has been introduced.

The compliance consists generally in the ability to ensure a given action (relatively to a known task) in a changing environment. A compliant robot is then a robot performing such an action while adapting to environment changes. For example, to reproduce a simple task for human like shaking hands, the robot has to care about anticipating the position of the hand, adjusting the force of the handshake, and withdrawing the hand after the appropriate amount of time. Here, the compliance can be defined as the respect of those three conditions that simultaneously form the action: shake hand.

The importance of compliance is mainly due to safety issues: the respect of this constraint assures to practice any activity safely. But concerning biomimetic robots, this criterion also constitutes the core of the performance of the robot itself. Indeed, if the robot is programmed to imitate perfectly a living being function, the compliance has to be maximized.

Two categories of compliance can be roughly set up: the compliance with a non-living environment (robots used in industry) and the compliance with humans (for human-robots interactions). The aim of this article is to develop those two aspects in details for biomimetic robots.

II. Compliance in industry

Because the majority of robots used in the industrial field mimics one or many function(s) usually performed by humans, such as putting together several parts of an object, they can be considered as functionally biomimetic robots.

A statistical study from Statistics Robotics 2015 indicates that the number of industrial robots has just skyrocketed, reaching 229 000 units in 2014 [1]. This increasing number is namely due to the number of tedious and boring tasks generally performed by humans. Generally, these tasks require contact between several tools. Previously performed by humans, the skills associated with contact efforts are now transferred to robots. Consequently, the robots now need to adapt continuously the forces it applies: it has to be compliant.

One distinction can then be drawn: either each component of the robot is flexible enough so that the accuracy of the task is not really altered by the contact forces (passive compliance), or the behaviour of the robot has to be modified to perform the task correctly (active compliance). Therefore the compliance is highly dependent on the choice of the components which constitutes the robots and of the choice of appropriate sensors. Furthermore, to get an active compliance, robots also need a quick and accurate automatic control.

As a reference, a robot constituted of only one articulated arm, similar to the human one (3 rotations allowed representative of the shoulder, the elbow and the wrist), has

been studied by many researchers. A tool placed in the wrist allows the robot to apply a force on a table. Then, two axes have particularly interested the researchers: the motion and the force of the robot. The next part focuses on the different ways to make the biomimetic robot compliant.

The structure of the robot can be divided in several parts, represented in figure 1.

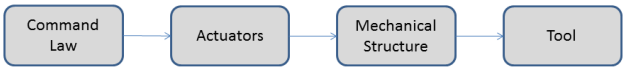


Fig. 1. Main parts of the robot

In fact, the compliance can be modified at each step of the process, either through the active or through the passive way.

A. Compliant Command Laws

The command laws are the first step defining the behaviour of the robot. It is the equivalent of the instructions of the user. But in addition to transferring the orders, the command laws are also adapted to the task with the use of feedback loops of some data depending on the measurements of sensors.

Then, the compliance of the robot is highly dependent on the effectiveness of these loops, in term of accuracy and speed. In reality, those loops are complex with several feedbacks namely reflecting the number of sensors.

For example, because the major criterion is the force, the simplest possible loop can be represented with blocks (see figure 2).

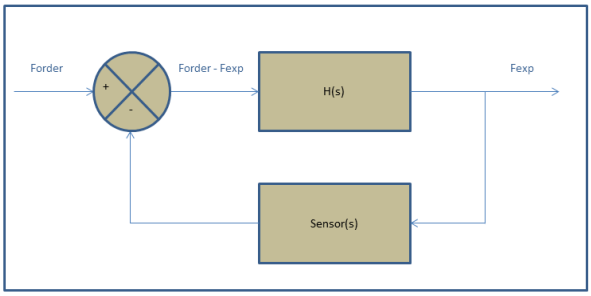


Fig. 2. Principle of the explicit force feedback command law

Here, H(s) represents the variable of the robot, Sensor(s) the parameter of the sensor. It is clearly visible that the force applied is also adapted to the measurements of the sensor. This command law is defined as an explicit force feedback one, and was developed by Whitney in 1987 [2].

Several command laws can be defined:

- Active Stiffness Command:

The active stiffness command was developed by Salisbury in 1980 [3]. This command is based on the simultaneous control of the force and the position of the robot through variations of the stiffness.

- Hybrid Command :

The hybrid command was developed by Raibert and Craig [4]. Basically, the loop is subdivided into two parts, one for each axis. Then, the global command law is given by the combination of the control law of the force and of the motion part, as highlighted in figure 3 (adapted from [5]).

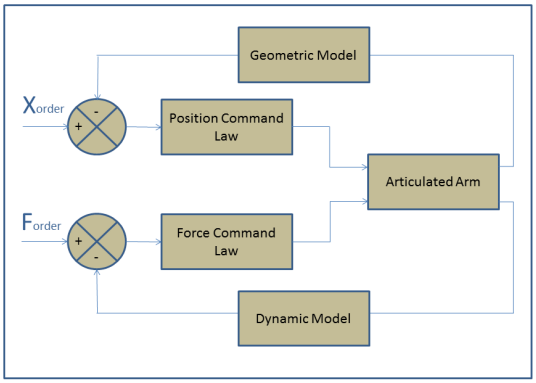


Fig. 3. Principle of the hybrid command law

The main advantage of the compliant command laws results in the fact that the structure of the robot has not to be modified to make it compliant.

Nonetheless, command laws are not necessarily adapted to the task and are often difficult to implement physically. And even if it respects those constraints, the compromise accuracy/speed is still problematic. Consequently the compliance has to be adapted through different ways.

B. Compliant Actuators

Instead of using compliant command laws, compliant actuators can be used. Basically actuators' role is to convert energy (hydraulic, pneumatic, electric, thermal, mechanical) to motion within the structure of the robot.

Some recent researches lead to a new generation of actuators dedicated to human movement mechanism (like catching an object with one's arm) for each kind of energy: Alfayad (2009) [6] developed a hydraulic compliant actuator controlled by displacement to provide optimal energy consumption during movement. Ben Hamed and Multon

proposed in 2007 an overview of the perspectives of development for electromagnetic actuators [7]. On the other hand, a model of pneumatic actuators, based on muscle physiology, has been studied by Klute in 1999 [8]. This last point is presented in the second part of this article.

The problem with compliant actuators mainly concerns safety issues: in case of an impact, the energy stored in the actuators can be released so compliant actuators can become a threat to humans. However, the diversity of actuators in terms of energy sources ensures to have one actuator compliant enough relatively to a certain task.

The position and the kind of actuators modify the local structure of the robot to adapt the compliance. The compliance can nevertheless be controlled in a global way by controlling the entire mechanical structure.

C. Compliance induced by the mechanical structure of the robot

Because of the numerous choices of materials to build the robot, the compliance, defined in this part as the flexibility of each part of the robot, is inherent to the structure of the robot itself. In addition to the materials, the kind of link between each part of the robot directly affects the freedom degree of the robot. Therefore the compliance can be controlled, up to a certain point, by the mechanical structure of the robot.

The main problem is that if a problem of compliance is detected, the entire mechanical structure has to be tested and modified. One advantage is that there are no hidden variables relatively to the structure: all the information is known.

Nonetheless, getting the entire robot compliant is not necessary. Indeed, in the case of industrial processes, the exterior environment is properly controlled. In those conditions, only the part of the robot directly in contact with the environment has to be compliant. To do so, the use of a compliant organ is required.

D. Compliant Organ

As explained before, the compliant organ is located in the mechanical structure at the contact area. The huge advantage of that method is that it is generalizable for all robots. Indeed, the compliant organ can be added easily and is adaptable to all tasks.

The compliant organ can be use both with active and passive compliance.

In the case of passive compliance, the most used compliant organ in the industrial field is the Remote Center Compliance (RCC), presented on figure 4.

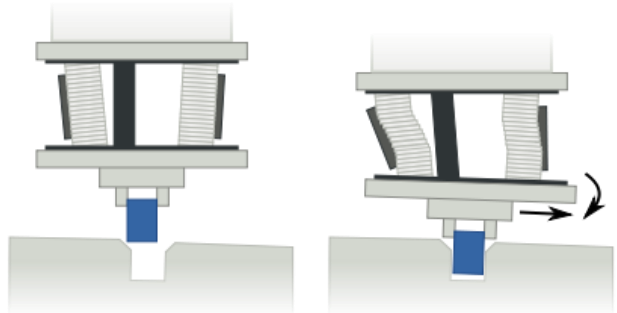


Fig. 4. Example of a task performed with a Remote Center Compliance

Even if the RCC is quite acceptable in terms of compliance, Lee (2005) and other researchers have proposed one upgrade of the RCC. [10]

When the task to perform is difficult, the active compliance is preferred, but it is necessary to have sensors and different command laws for the compliant organ. The interest of the compliant organ is then limited by the constraints on the command laws (see part II.A).

E. Summary

The compliance of a biomimetic robot in industry is dependant on a lot of factors. Some technical considerations were developed to control robot compliance. The pros and the cons of each evoked solution are synthesized in the table I.

TABLE I. IMPACT OF THE PROPOSED SOLUTIONS ON THE COMPLIANCE

Technical Point	***Advantages***	***Drawbacks***
Command Law	Independence of the structure of the robot Speed and Accuracy can be controlled at the same time	Speed and Accuracy are correlated Command Law not necessarily adapted Difficult to implement physically
Actuators	Large range of choice	Still in research Possibly harmful
Mechanical Structure	Dispose of all the information	Only dependent on the structure of the robot (not generalizable)
Compliant Organ	Compliance localized Generalizable Accurate	Compliance localized Need active compliance for difficult tasks

In this part we discussed the compliance with a non-living environment for biomimetic robots used in industry.

Nonetheless, with the advance of robotics search, new applications for robots have been imagined. The robots are now not to be used only to perform specific industrial tasks, but can also be used as social robots, that is, androids that interact with humans in their daily life.

III. Compliance during robot-Human interaction

In the case of human-robot interaction, the compliance problematic is slightly different: the robot must now be completely harmless and safe during its physical and functional interactions with humans. The main stake is to design a robot with autonomous behaviour, yet able to react to unexpected behaviours from surrounding humans.

Several solutions are proposed that aim at increasing the robot compliance during physical contact, especially in environments that are not - as opposed to industrial environments - controlled and structured. The solution is thought as adaptable functional compliance, which includes the modulation of the robot's own compliance according to the situation. Figure 5 summarizes the issue of compliance in human-robot interactions.

Environment	Robot behavior
Free space, controlled environment	Stiff and automatic behavior
Constrained environment, interaction needed	**Compliant** behavior

Fig. 5. Compliance Issue in different environments

A. *Human-robot interactions and the need for compliance*

First we present some of the applications of robotics that include a physical contact between the robot and a human, and explain why compliance is crucial in each situation.

First, as said, if robots used in industry to perform specific highly-precise tasks need stiff articulations, in an environment with human we can imagine a dual problematic: the robot must keep some stiffness during certain precise tasks such as grasping and placing an object. However, it must also be compliant during physical contact with humans, which means it must be able to adapt its strength when confronted to a moving human being.

Recently, a new category of robots has emerged called robotic companions. In particular, some active relational affective companions have been developed, like the Huggable [11], which is a small robot that responds, through somatic sensors, to haptic interactions from the human. This companion robot is shown in Figure 6. As they are developed mainly for children, the applied forces can be different from an implemented motion; thus compliance from the robot is really important for two reasons: it prevents damages of the mechanisms by adapting to unexpected movements, and it also gives a more natural feeling to the user.

Fig. 6. The companion robot Huggable -

Importance of the compliance for toy robots

Lastly, the field of physical rehabilitation is now concerned by robotics: instead of requiring expensive and time-consuming rehabilitation sessions with physical therapists, repeated movements that have to be applied to patients could be performed by biomimetic robots. In gait rehabilitation, a few designs have been proposed, such as Lokomat) [12], which must be able to cope with potential erroneous movements coming from the patient, and thus have to be compliant so they won't hurt the user.

To conclude, the use of compliant structures is necessary in numerous applications, and we will now present the work done on adjustable compliant actuators, that are used to replace the stiff actuation schemes usually used in robots.

B. *Adjustable compliant actuators as a solution for compliance*

As previously defined, an actuator is a part of a robot that converts stored energy into movement. Two types of actuators are defined: compliant actuators and stiff actuators. The latter is a device that is able to make precise movements toward a location, and to stay in the desired location despite any external forces applied to it. A compliant actuator is instead capable of adapting its equilibrium position -that is, the position when the actuator doesn't generate any force- according to the forces that are applied. The main issue is to control the level of stiffness of the actuators. This notion is biologically inspired: by using antagonist muscle groups and visco-elastic joints, livings being are able to accomplish locomotor stability and mobility in a variety of environments. Muscles are usually modelled by active and passive components: the active components generate a motor movement while passive components allow the organism to maintain stability in various terrains [13].

Based on these considerations towards biological imitation, one way of designing adjustable compliant actuators is through antagonistic-controlled stiffness [14]. A well-known example is the control of a human arm: it is operated by the biceps and triceps muscles that allow a flexion of the arm when the biceps contracts, and an extension of the arm when the triceps contracts. For these two movements, the non-contracted muscle must be relaxed. However, it is also possible to contract the two muscles at the same time, resulting in stiffening the elbow, or to relax the two muscles, which makes the elbow compliant.

In robotics, it has been shown that the use of linear springs was not an acceptable solution for a compliant joint. Instead, nonlinear springs must be used to simulate muscles. Nonlinear springs follow a nonlinear equation between force and displacement: in other words, when undergoing a working load, they do not exert a proportional amount of force, as can be seen on figure 7. By combining two nonlinear springs with rotating servomotors, it is possible to design a joint that can both change its position (move in space) and adapt its compliance to the forces applied to it. Another way of creating artificial muscles that mimic compliant biological movements is the use of pneumatics. Pneumatic artificial muscles (PAM) use the pressure of air to contract and expand; the compliance here comes directly from the inherent property of air to be compressible.

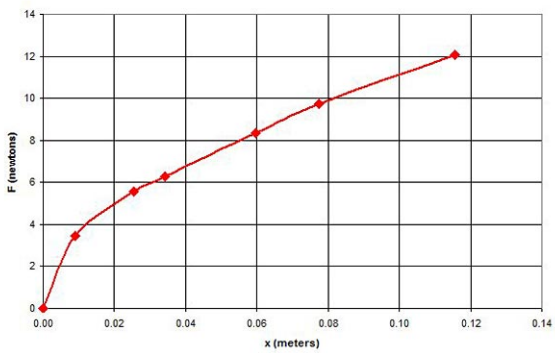


Fig. 7. The nonlinear relation between force and displacement in a nonlinear spring

We presented here one way of producing compliant biomimetic robot parts, i.e. the use of antagonist muscles as adjustable actuators. We have to note that other solutions have been proposed to control joint stiffness that we will now briefly review.

- Equilibrium-controlled stiffness. By the use of series elastic actuators (SEA), the force of the joint can be controlled relative to its equilibrium position and to the deviations externally applied to it.
- Structure-controlled stiffness. Here the variation of stiffness is achieved through the change of the physical structure of the elastic element of the joint, i.e. the spring. For example, in a recently proposed model, it is possible to constantly change the number of available coils of a spring, resulting in a compliant joint. See figure 8 for an illustration (from [15]).
- Mechanically-controlled stiffness. As in the structure control, it is the effective physical stiffness of the system that is adjusted. However, here the entire spring is always used, and the control is made at the junction between the spring and the rest of the structure: this allows a modification of the pretension of the spring.

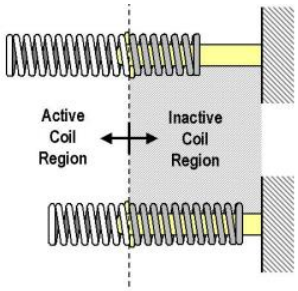


Fig. 8. Structure-controlled stiffness, through the number of available coils in the spring

To conclude, several ways now exist to adjust in real-time the stiffness, and thus the compliance of the joints used in robots. All these strategies aim at reproducing living being-like compliance, which is the key to safe and natural interactions with humans.

C. Materials, the "touchable" part of compliance

Apart from these force control and compliance control considerations, another important aspect in human-robot interactions is the material used to design the robot. Indeed, compliance can be thought as the force applied during an interaction, but also as the haptic perception offered by the contact. It is hard to imagine a natural contact with a stiff and solid robot hand during a handshake, or to trust an austere and artificial socially assistive robot around children.

Several materials have been proposed to make the physical contact natural and pleasant. In this last part, we will consider the requirements for making sociable robots that will physically interact with humans, in term of physical touch.

The sense of touch is important in human interactions: shaking hands, patting someone's back are everyday actions that require touching. If robots are introduced in our lives as social companions, a humanlike appearance and softness must be achieved in order to get a smooth and more natural relationship. We will thus focus on how to render a hand as biomimetic as possible, regarding its visible and touchable properties. First it is necessary to select the criterions that should be met by an artificial material to replace human flesh and skin. Several properties of such materials can be discussed : it should be soft, elastic, possess some mechanical resistance, mimic the frictional properties of human skin, or look like a human hand. The choice of prioritizing some of these

properties will then influence the materials that will be used to construct the robot. One of the approaches used to select appropriate materials, discussed in [16] is the comparison between the chosen material and a human fingertip. If biomimetic is what is wanted, then a comparison with human seems like a good tool to select materials that behave like human flesh. The fingertip has been largely studied, and numerous data about the mechanical properties of the human fingertips exist.

The first important notion regarding skin mimicking is the notion of conformance, which is the ability of the skin to conform, to cover an object's surface hen touching or grasping it. It is important for the tactile recognition of the objects, especially if we consider tactile recognition mechanisms beneath the skin. When shaking hands, the robotic hand should be able to adapt and conform to the contours of the human hand, so that the force and tactile sensors can get the proper information from this contact. In order to achieve this conformance requirement, the skin must be soft enough to allow deflection when encountering physical matter. Two of the common materials now used to design robots are silicone and polyurethane, as they are supposed to accurately imitate human flesh. It has been shown, however, that these materials are still far from biomimetic, since their compliance is lower than human skin, despite an acceptable conformance. Finally, some new solutions are arising, consisting of heterogeneous layers of different materials, which seem to allow a better compliance for biomimetic hands. [17]

To conclude, some of the classical materials used for designing robots are appearing to be insufficiently compliant, which is a problem when considering that social robots would physically interact with humans on their daily lives.

Working on both the force and compliance control, and on the material that will make the contact with the human is now essential to create robots that are safe to use, and act naturally in a changing environment, surrounded by humans that cannot always interact on them the way they were programmed (children, disabled people …).

IV. Conclusion

In this work we have shown how compliance can be adapted for biomimetic robots. One distinction has been done regarding the environment surrounding those robots: either it is a controlled, human-free environment, or an environment around humans, that can change every second. The notion of compliance has then two different significations: it consists either in successfully performing a given task (robots in industry) by imitating a human operator, or in being safe and pleasant for human (android robots for example). Future work must focus on rendering the robots as human-like as possible: work on compliance must encompass a variety of environments, and trying to copy the biological systems seems to be as challenging as necessary to create robots that act, behave, move and react like us.

References

[1] World Robotics 2015 Industrial Robots, Executive Summary, p13

[2] Daniel E. Whitney. "Historical perspective and state of the art in robot force control". International Journal of Robotics Research, vol. 6, pages 3 – 14, 1987.

[3] Salisbury, J. K. (1980, December). "Active stiffness control of a manipulator in Cartesian coordinates". In Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes, 1980 19th IEEE Conference on (pp. 95-100). IEEE.

[4] Raibert, M. H., & Craig, J. J. (1981). Hybrid position/force control of manipulators. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 103(2),126-133.

[5] Schematic of the hybrid command law by Craig and Raibert: http://starpsi.free.fr/TIPE/ressources_tipe/Bo%EEte%20%E0%20id%E9e/Robotique/prehension/chapitre1.pdf

[6] Alfayad, S., Ouezdou, F. B., Namoun, F., & Cheng, G. (2009, May). "Lightweight high performance integrated actuator for humanoid robotic applications: modeling, design & realization." In Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference on (pp. 562-567). IEEE

[7] H Ben-Ahmed et B. Multon : "Les actionneurs électromagnétiques : quels choix pour la robotique?" In Journées Nationales de la Recherche en Robotique, octobre 2007

[8] Klute, G. K., Czerniecki, J. M., & Hannaford, B. (1999). "McKibben artificial muscles: pneumatic actuators with biomechanical intelligence." n Advanced Intelligent Mechatronics, 1999. Proceedings. 1999 IEEE/ASME International Conference on (pp. 221-226). IEEE.

[9] Lee, S. (2005). "Development of a new variable remote center compliance (VRCC) with modified elastomer shear pad (ESP) for robot assembly." Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on, 2(2), 193-197.

[10] Stiehl, W. D., Lieberman, J., Breazeal, C., Basel, L., Lalla, L., & Wolf, M. (2005, August). Design of a therapeutic robotic companion for relational, affective touch. In *Robot and Human Interactive Communication, 2005. ROMAN 2005. IEEE International Workshop on* (pp. 408-415). IEEE.

[11] S. Jezernik, G. Colombo, T. Keller, H. Frueh, and M. Morari, ''Robotic orthosis lokomat: A rehabilitation and research tool,'' Neuromodulation, vol. 6, no. 2, pp. 108–115, Apr 2003

[12] Xiong, X., Wörgötter, F., & Manoonpong, P. (2014). Virtual agonist-antagonist mechanisms produce biological muscle-like functions: An application for robot joint control. *Industrial Robot: An International Journal*, *41*(4), 340-346.

[13] Ham, R. V., Sugar, T. G., Vanderborght, B., Hollander, K. W., & Lefeber, D. (2009). Compliant actuator designs. *Robotics & Automation Magazine, IEEE,16*(3), 81-94.

[14] Hollander, K. W., Sugar, T. G., & Herring, D. E. (2005, June). Adjustable robotic tendon using a'jack spring'™. In *Rehabilitation Robotics, 2005. ICORR 2005. 9th International Conference on* (pp. 113-118). IEEE.

[15] Cabibihan, J. J., Pattofatto, S., Jomâa, M., Benallal, A., & Carrozza, M. C. (2009). Towards humanlike social touch for sociable robotics and prosthetics: Comparisons on the compliance, conformance and hysteresis of synthetic and human fingertip skins. *International Journal of Social Robotics*, *1*(1), 29-40.

[16] Cabibihan, J. J., & Ge, S. S. (2009). Towards humanlike social touch for prosthetics and sociable robotics: Three-dimensional finite element simulations of synthetic finger phalanges. In *Advances in Robotics* (pp. 80-86). Springer Berlin Heidelberg.

Index alphabétique

acceptation, 71
agent virtuel, 29
apprentissage, 53
art, 61

biomimétisme, 81

cobotique, 45
compliance, 81

environnement intelligent, 67

interaction, 1, 37
    interaction physique, 1
    interface cerveau-machine, 37

présence, 67

robot industriel, 45
robot social, 1, 9, 17, 29, 67, 71
    enfant, 17
    personnalité, 9

sécurité, 45

Année universitaire 2005-2016
Grenoble, France