



HAL
open science

Interaction naturelle et intuitive : pourquoi un objet interactif doit revêtir un caractère "non-intentionnel" ?

Ghilès Mostafaoui, Lise Aubin, Eva Ansermin, R Schmidt, Ludovic Marin

► **To cite this version:**

Ghilès Mostafaoui, Lise Aubin, Eva Ansermin, R Schmidt, Ludovic Marin. Interaction naturelle et intuitive : pourquoi un objet interactif doit revêtir un caractère "non-intentionnel"?. Drôles d'objets: un nouvel art de faire, Oct 2021, La Rochelle, France. 10.5281/zenodo.6059643 . hal-03592863

HAL Id: hal-03592863

<https://hal.science/hal-03592863v1>

Submitted on 1 Mar 2022

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.

Interaction naturelle et intuitive : pourquoi un objet interactif doit revêtir un caractère "non-intentionnel" ?

Ghilès Mostafaoui¹, Lise Aubin^{1,2}, Eva Ansermin¹, R. C. Schmidt³, Ludovic Marin²

¹Laboratoire ETIS ENSEA, Cergy-Paris Université, CNRS (UMR 8051)

²EuroMov Digital Health in Motion, Université Montpellier, IMT Mines Ales

³Department of Psychology, College of the Holy Cross, Worcester, USA

Introduction

L'acceptabilité et l'efficacité des Interactions Humain-Robot (IHR) ou des Interfaces Humain-Machine (IHM) au sens large, sont deux questions centrales. Les difficultés que peuvent avoir les systèmes informatiques complexes à s'adapter au monde humain et à interagir avec lui d'une manière qui émule le travail collaboratif humain-humain posent la question de la compréhension et de la maîtrise de l'évolution d'IHM ou d'IHR intuitives, agréables et efficaces. Travailler sur les caractéristiques techniques de l'IHM (la conception de leur apparence, les traits de comportement superficiels etc.) peut contribuer à certaines solutions partielles pour des interactions ponctuelles ou à court terme. Malgré des progrès notables, les IHM restent à ce jour peu intuitives. La question de l'« intuitivité » des IHM est donc une problématique difficile. L'impact de la charge cognitive induite par une IHM peut provoquer d'importants déficits d'efficacité, voire l'arrêt de l'interaction. Dans le cadre, par exemple, des IHR, cette question peut être abordée au travers de divers aspects, on peut citer de manière non-exhaustive : la communication verbale, les communications non-verbales (expressions faciales, postures, gestes co-verbaux etc.), la morphologie, la sécurité ou encore l'éthique.

Néanmoins, la « dynamique des interactions » est souvent négligée, elle est pourtant d'une importance capitale. En effet, l'une des raisons principales limitant l'intuitivité des IHM est leur manque d'adaptabilité aux rythmes naturels d'interaction de l'humain, qui oblige ce dernier à corriger son comportement de manière « intentionnelle » en fonction de la machine (robot, avatar ou environnement virtuel). La conception d'IHM avec des dynamiques d'interaction perçues comme plus « naturelles » ou plus « intuitives » pose légitimement la question de la caractérisation des dynamiques d'interaction chez l'humain. En effet, plutôt que de se baser sur des solutions complexes existantes, il serait judicieux d'exploiter les propriétés de stabilité et d'adaptabilité naturelles des dynamiques d'interaction chez l'humain pour améliorer l'intuitivité des IHM et repenser les approches actuelles utilisées pour les concevoir.

Le comportement d'un individu, intentionnel ou non, est modifié par les interactions avec les autres. Ces modifications vont de l'imitation à la synchronisation spontanée, elles ont été observées dans des groupes dont la taille varie, de dyades à des milliers de personnes [1]. Le comportement d'un individu dit « social » est influencé par celui des autres qui l'entourent. On parlera alors de coordination interpersonnelle. Ce phénomène est le résultat d'une adaptation réciproque du comportement des partenaires [2]. La

coordination interpersonnelle joue un rôle important dans la communication non-verbale. Elle peut être liée, à titre d'exemple, au facteur d'intimité entre les personnes [3].

On peut définir deux types de coordination : le matching comportemental (imitation) et la synchronisation interpersonnelle (mouvement synchrone dans le temps) [4]. La coordination interpersonnelle implique la faculté à être « entraîné » (mouvement) par des stimuli extérieurs provenant ou non d'autres personnes. Ce phénomène, pouvant être intentionnel ou non-intentionnel, est très présent chez l'humain lors de ses interactions sociales. Les premières études du phénomène d'entraînement datent des années 1980. *Wylie* fut un des premiers à penser que ce phénomène jouait un rôle essentiel dans les communications interpersonnelles. *Bernieri* voit dans ce phénomène une nouvelle méthode pour étudier les coordinations interpersonnelles [4]. En 1995, *McNeill* explique que ce phénomène peut faciliter des situations complexes et interdépendantes de coordination : sport, jeux, communication verbale, expressions émotionnelles, musique, danse etc. [5, 6]. De nombreuses études montrent que ce phénomène d'entraînement permettrait d'indiquer une perception mutuelle au cours d'une expérience sociale et qu'il constitue un des mécanismes à l'origine d'une imitation physique et émotionnelle [7, 8]. Certains auteurs [9] parlent d'entraînement social lorsque des individus se co-entraînent c'est-à-dire lorsque les sorties rythmiques générées par les uns deviennent les entrées rythmiques des autres. Ce phénomène aussi appelé entraînement interpersonnel a été observé chez de nombreuses espèces [10]. On parlera alors d'entraînement mutuel ou bidirectionnel.

Afin de prendre en compte ses effets d'entraînements mutuels dans la conception des IHM il est possible d'adopter une approche radicalement simplificatrice, qui consiste à prendre avantages des récentes découvertes sur les interactions sociales de bas niveau et les dynamiques de contrôle moteur chez l'humain. En effet, dans le cadre d'interactions intuitives entre les humains, les adaptations « non-intentionnelles » des dynamiques de mouvement jouent un rôle primordial de facilitation de la communication. Cette communication naturelle n'est néanmoins possible que dans le cadre d'une adaptation bidirectionnelle entre les deux agents qui consciemment ou inconsciemment ajustent leurs rythmes d'interaction en fonction de l'autre. Un exemple parlant est celui de deux personnes marchant côte à côte et n'ayant pas les mêmes tailles ni les mêmes fréquences naturelles de marche et qui pourtant se mettent à synchroniser leurs pas. Cette adaptation inconsciente ou automatique laisserait ainsi la possibilité de focaliser notre attention sur une discussion, une direction ou un autre événement tout en synchronisant notre locomotion sur celle de notre interlocuteur.

Néanmoins, si les coordinations interpersonnelles non-intentionnelles sont très présentes dans les interactions humain-humain, elles sont très peu étudiées dans le cadre des interactions humain-machine. Nos travaux ont donc pour objectif d'analyser ces phénomènes d'entraînement rythmiques non-intentionnels dans le cadre d'IHM ou d'IHR où la question de l'existence même de ces phénomènes peut se poser. Avant d'aborder cette question spécifique des adaptations rythmiques non-intentionnelles en IHR, nous allons, en premier lieu, introduire les coordinations interpersonnelles chez l'humain.

1. Coordinations interpersonnelles intentionnelles et non-intentionnelles chez l'humain

Bien que les humains interagissent généralement par le biais du langage, il est maintenant reconnu qu'ils coordonnent également leur corps lors des interactions sociales [11]. Par exemple, des individus peuvent être synchronisés avec leur interlocuteur lors d'une discussion [12]. A partir du moment où il y a un contact perceptif entre les deux partenaires lors d'une interaction, la coordination interpersonnelle est le plus souvent présente dans notre vie quotidienne. Il est même difficile d'éviter la coordination interpersonnelle en présence de quelqu'un qui bouge devant nous [13]. On peut distinguer deux types de coordinations : « les coordinations intentionnelles » et les « coordinations non-intentionnelles ». La notion d'intentionnalité est une notion complexe dont le sens est notamment dépendant du champ disciplinaire dans laquelle elle est utilisée. *Norman* [14], en 1986, a défini l'intention comme une décision d'agir pour atteindre un but. *Malle et Knobe* [15] ont proposé en 1997 un modèle du concept d'intentionnalité désignant le caractère fondamentalement orienté de la conscience vis-à-vis d'un objet, quel qu'il soit. Dans le cadre des coordinations motrices, on parle de « coordinations intentionnelles » lorsque l'action résulte d'un processus de décision. Autrement dit, lorsque les individus sont conscients des stimuli rythmiques qui les entourent et qu'ils cherchent volontairement à se synchroniser.

A l'inverse, la coordination non-intentionnelle est spontanée, involontaire. Elle n'en reste pas moins très courante dans notre vie quotidienne : lors d'une interaction sociale, les rythmes de nos mouvements ont tendance à être spontanément entraînés par la cadence des mouvements de nos partenaires. *Schmidt et O'Brien* (1997) ont été les premiers à formaliser ce phénomène dans une expérience dans laquelle deux participants assis l'un à côté de l'autre ont reçu l'ordre de balancer un pendule portatif à leur propre fréquence en regardant ou non (condition de contrôle) le pendule de l'autre participant [16]. Les résultats ont montré que les participants se sont synchronisés les uns avec les autres lorsqu'ils regardaient le pendule de l'autre, même s'ils n'en avaient pas l'intention : ils se sont coordonnés spontanément sans s'en rendre compte. Dans une expérience plus récente, *Issartel et al.* (2007) ont explicitement demandé aux participants de « ne pas » se synchroniser avec un autre participant assis devant eux tout en improvisant des mouvements de l'avant-bras. Les résultats ont démontré que même si les participants déclaraient que l'autre personne ne les avait pas influencés, ils ne pouvaient éviter de se synchroniser avec leur partenaire [17]. Les coordinations interpersonnelles intentionnelles et non intentionnelles partagent certaines propriétés communes. Premièrement, il n'y a pas de coordination interpersonnelle sans échange d'informations entre les deux agents [18]. Cet échange perceptif peut se produire à travers des informations visuelles [19], auditives [20] ou tactiles [21]. La deuxième propriété commune est que les performances de coordination sont plus fortes dans un couplage bidirectionnel que dans un couplage unidirectionnel. Le couplage bidirectionnel se produit lorsque les deux participants sont influencés l'un par l'autre. Quand l'un agit, l'autre réagit en fonction de l'action du premier et ainsi de suite [22]. En revanche, un

couplage unidirectionnel implique l'adaptation d'un seul des participants. Enfin, les deux types de coordinations partagent les mêmes modes de synchronisation : en phase et en anti-phase.

Bien que la coordination interpersonnelle intentionnelle et non intentionnelle partagent des propriétés communes, il existe des différences significatives entre ces deux modes. Le plus important et le plus évident est que la coordination non intentionnelle est moins stable que l'intentionnelle. La coordination intentionnelle est favorisée par la volonté des deux participants à agir ensemble. Dans ce cas, ils peuvent se coordonner presque parfaitement ensemble, c'est ce qu'on appelle la coordination absolue [23], au même tempo avec une relation de phase stable. A l'inverse, dans une interaction sociale où la coordination corporelle n'est pas le but recherché, on observe un entraînement et donc une coordination mais sans relation de phase stable car les mouvements sont souvent à des rythmes différents [24]. Cette forme plus faible de coordination est appelée coordination relative [23]. Ce que l'on voit, par exemple, dans l'étude de *Schmidt et O'Brien (1997)*, est un entraînement métastable autour des attracteurs de phase relative stables de 0° et 180° spécifiques aux modes en phase et en anti-phase, respectivement. Notez cependant que, si les deux participants ont des fréquences de mouvements très différentes (par exemple l'un à haute fréquence et l'autre à basse fréquence), il est possible de ne pas observer de synchronisation car la différence de fréquence est trop importante pour que le couplage sensori-moteur puisse contrebalancer un tel écart [24]. La condition idéale pour observer une coordination non-intentionnelle est lorsque les deux sujets bougent à plus ou moins 10% de leur fréquence préférée [18]. Pour des différences de fréquence supérieures, la coordination prend plus de temps à émerger ou peut même ne jamais se produire.

2. Les coordinations interpersonnelles en IHR

Les études précédemment rapportées décrivent la coordination entre humains. On peut alors se demander ce qui se passe si une personne interagit avec des agents artificiels tels que des robots. Les humains sont-ils capables de se synchroniser de la même manière avec des robots ? Cette dyade humain-agent artificiel suit-elle les mêmes règles que la coordination interpersonnelle humain-humain ? Un entraînement rythmique non intentionnel peut-il se produire lors de l'interaction avec un robot ? Nous proposons d'aborder ces questions dans ce qui suit.

La coordination interpersonnelle et la synchronie ont été analysées sous différents points de vue en robotique. D'abord dans le cadre de jeux d'imitation où les dynamiques sensorimotrices interpersonnelles ont été utilisées pour étudier différents aspects de l'interaction sociale : couplage moteur et tour de rôle des agents [25], détection d'imitation par la construction de cartes interpersonnelles [26], apprentissage en utilisant la synchronie comme récompense interne [27] ou comme signal de renforcement pour apprendre de nouvelles associations sensorimotrices [28]. Ensuite, l'engagement et l'attention lors d'une interaction humain-robot (IHR) ont également été améliorés en utilisant des signaux sensoriels multimodaux synchronisés [29-31]. Enfin, concernant les

robots d'assistance pour les soins cliniques, plusieurs auteurs soutiennent que la synchronie et la réciprocité sont des mécanismes clés qui affectent à la fois le comportement (mouvements) et le niveau social [32]. Néanmoins, malgré ce caractère important des coordinations interpersonnelles, souligné par les nombreuses et différentes études ci-dessus, son efficacité et sa caractérisation dans le cas des IHR (par rapport aux interactions sociales humaines) font toujours débat. Des affirmations totalement opposées existent. *Kilner et al. (2003)* suggèrent que les robots ne déclenchent aucune interférence motrice (suggérant que l'interférence est un type de coordination interpersonnelle) lorsqu'ils interagissent avec un humain [33]. Les auteurs ont utilisé dans ce cas un bras de robot non humanoïde. *Oztop et al. (2005)* ont reproduit le même genre d'expérience avec, cette fois, un robot humanoïde. Ils ont alors montré que les humains étaient autant influencés par le robot que par un humain [34]. De même, *Shen et al. (2011)* ont étudié l'inférence motrice et la coordination motrice dans les interactions humain-humanoïde pour différents types de stimuli visuels (robot, pendule et point mobile). Les auteurs ont conclu que les participants avaient tendance à se synchroniser avec des agents ayant une apparence plus « humaine » [35]. D'autres soutiennent que la ressemblance motrice et la résonance motrice sont plus importantes que l'apparence physique. *Marin et al. (2009)* ont souligné que la résonance motrice entre les robots (humanoïdes) et les humains pourrait optimiser la compétence sociale des IHR [22]. D'autres résultats indiquent que les perceptions de la ressemblance peuvent être manipulées par de simples changements, tels que la variation du répertoire de mouvements, la coordination ou la synchronie du robot [36]. *Lehmann et al. (2015)* ont utilisé un robot non anthropomorphe avec une gamme limitée de mouvements expressifs. Ils ont démontré que les mouvements synchronisés étaient perçus positivement et étaient interprétés par les participants comme un engagement et créaient une disposition positive envers le robot [37]. Bien qu'il existe une myriade d'articles sur la coordination humain-robot, la plupart de ces études traitent de la coordination intentionnelle. Afin de construire des robots qui peuvent interagir naturellement avec les humains, nous soutenons qu'il est nécessaire de mieux étudier la coordination en IHR en la comparant aux caractéristiques de la coordination sociale humaine. La coordination non intentionnelle humaine avec un robot doit donc être prise en compte.

3. Etudes des phénomènes des coordinations interpersonnelles non-intentionnelles en IHR

Nous émettons l'hypothèse que, comme pour l'interaction humain-humain, la coordination humaine non intentionnelle est présente et importante dans les IHR. Ces phénomènes n'ont cependant jamais été réellement étudiés dans le cadre des IHR. Nous avons alors mené plusieurs études, dont celle résumée ci-dessus, qui visent à confirmer notre hypothèse. En plus de l'état de l'art ci-dessus, le sujet de cette étude que nous présentons ici a été motivé par des travaux et des résultats fondateurs récents. En premier lieu, plusieurs articles ont montré que les humains se synchronisent intentionnellement et non intentionnellement avec un signal sensoriel non social tel qu'un objet perçu se déplaçant sur un écran [19]. Néanmoins, les auteurs de ces travaux n'ont pas utilisé de robots ou d'agents artificiels, ils n'ont pas non plus utilisé de signal sensoriel adaptatif

pour permettre une interaction bidirectionnelle. Cependant, ces travaux ont clairement démontré la présence du phénomène (entraînement rythmique non-intentionnel) lorsque le signal sensoriel n'est pas produit par l'humain, ce qui souligne le fait que le même résultat devait être obtenu lorsqu'une personne fait face à un robot (agent artificiel). C'est précisément ce que nous cherchons à observer et à démontrer.

L'objectif de la présente étude est donc d'analyser la coordination interpersonnelle humaine lors d'une interaction avec un robot. Nous abordons spécifiquement les questions suivantes : i) Pouvons-nous confirmer, dans le cadre d'une IHR, l'observation de l'entraînement et de la synchronisation rythmiques non intentionnelle humaine ? ii) si oui, quel comportement du robot (robot adaptatif vs non adaptatif) favorise le mieux un tel phénomène ? Et enfin, iii) Comment comparer l'IHR avec les interactions humain-humain en termes de stabilité de la coordination interpersonnelle concernant deux aspects différents : 1) entraînement rythmique unidirectionnel (robot à fréquence fixe) versus bidirectionnel (robot à fréquence adaptative) et 2) comportement de l'humain intentionnel versus non intentionnel ?

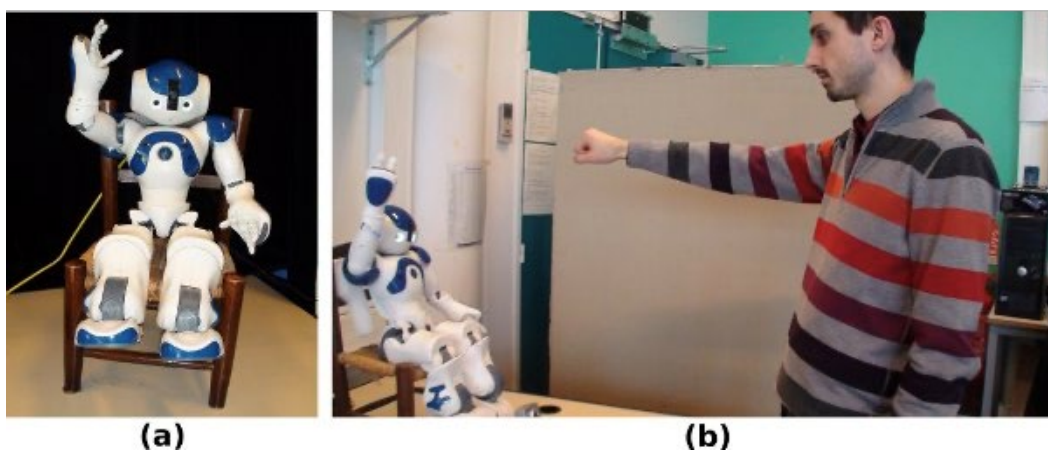


Figure 1. Setup Expérimental. (a) le Robot NAO (b) Le robot en interaction avec une sujet humain

3.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental était similaire à celui décrit Figure 1. Une caméra externe a été utilisée pour la vision du Robot. Le robot était contrôlé par un ordinateur portable exécutant un modèle de contrôle neuronal permettant au robot d'effectuer la tâche et, selon les conditions, de synchroniser son comportement avec les dynamiques de mouvement du partenaire humain (apparents dans le champ visuel du robot). Deux goniomètres filaires ont été utilisés pour mesurer les signaux de mouvement (déplacements angulaires de l'épaule), l'un sur l'épaule de NAO et l'autre sur les épaules des participants.

3.2 Participants

15 jeunes adultes (8 hommes, 7 femmes) de l'Université de Montpellier ont participé à l'expérimentation. Leur âge était compris entre 18 et 25 et leur taille était comprise entre 1,56 m et 1,9 m. Quatorze des participants étaient droitiers et un était gaucher. Tous les sujets étaient en bonne santé sans altérations physiques, psychologiques ou neurophysiologiques signalés.

3.3 Procédure

Le robot NAO peut avoir ici deux modes de comportement différents : déplacer son bras verticalement avec une fréquence prédéfinie et fixe ou, grâce au modèle neuronal de contrôle oscillatoire décrit par *Hasnain et al. (2012)* [38], avec une fréquence adaptative lui permettant de se synchroniser avec des sujets humains. La tâche des participants était de bouger leur bras verticalement devant le robot NAO (voir Figure 1-b) dans cinq conditions différentes :

- Dans la condition 1 les sujets avaient les yeux bandés et des écouteurs afin qu'ils ne puissent ni voir ni entendre le robot. Le robot était capable de se synchroniser avec les participants.
- Dans la condition 2 le robot avait une fréquence fixe et les participants pouvaient voir et entendre le robot, ils devaient bouger à leur fréquence préférentielle.
- Dans la condition 3 le robot avait une fréquence adaptative (comme dans la condition 1) et les participants pouvaient voir et entendre le robot, ils devaient bouger à leur fréquence préférentielle.

Les conditions 4 et 5 sont respectivement similaires aux conditions 2 et 3 mais on a demandé explicitement aux sujets de se synchroniser sur le robot. Les conditions 2 et 3 étaient des conditions non intentionnelles et les conditions 4 et 5 étaient des conditions intentionnelles. Les conditions 1, 2 et 4 sont unidirectionnelles (seul un agent peut s'adapter à l'autre) et les conditions 3 et 5 sont bidirectionnelles. Pour toutes les conditions, aucune connaissance a priori n'a été donnée au sujet sur la façon dont le robot allait se déplacer ou réagir lors de l'interaction. Afin d'éviter un impact sur les conditions non intentionnelles, les conditions intentionnelles ont toujours été réalisées après la condition 1 et les deux conditions non intentionnelles.

3.4 Résultats

Les résultats de cette étude, détaillés dans [39] sont résumés ci-dessous. Sans surprise, dans les conditions intentionnelles (4 et 5) l'analyse des périodes moyennes des mouvements a montré une correspondance de tempo presque parfaite qui confirme les capacités humaines à coordonner et à se synchroniser intentionnellement [40]. Les écarts types des périodes ont révélé de faibles variations de tempo dans des conditions intentionnelles. Dans la condition 1, les périodes moyennes des humains et du robot

étaient proches, montrant que le robot était capable de s'adapter au rythme défini par les participants (qui avaient les yeux bandés).

Concernant les conditions non intentionnelles (2 et 3), les résultats sur les périodes et leurs écarts types étaient informatifs sur les concepts d'entraînement rythmique non intentionnel unidirectionnel et bidirectionnel. Par rapport à la condition 1, la condition 2 présentait une période moyenne significativement inférieure sans représenter plus de variabilité. Ces résultats ont démontré que, si le participant trouvait une certaine stabilité en essayant de garder son rythme en présence de perturbation rythmique (mouvement du robot à tempo fixe), il ne pouvait pas éviter l'entraînement rythmique et était accéléré par le Tempo du robot. La condition 3 a montré de manière intéressante que le tempo mutuel humain et robot était un compromis entre le rythme préféré des participants (conditions 1) et le rythme initial fixe du robot. Cette condition a démontré un entraînement rythmique bidirectionnel clair, les humains étaient accélérés par le robot et inversement, le robot était ralenti par les participants. En résumé, le résultat important à souligner ici concernant le tempo est évidemment le fait que, dans les deux conditions unidirectionnelles et bidirectionnelles (conditions 2 et 3), un entraînement rythmique non intentionnel humain a été observé lors de l'interaction, confirmant ainsi notre hypothèse. Le degré de synchronisation et de coordination a été évalué par la variance circulaire et la distribution relative de l'angle de phase (entre les signaux de mouvement du robot et ceux des sujets). Les résultats ont classé les conditions de synchronisation moyenne de la plus faible à la plus élevée comme suit : condition 2 (unidirectionnelle, non intentionnelle), condition 1 (unidirectionnelle avec des sujets aux yeux bandés), condition 3 (bidirectionnelle, non intentionnelle), condition 4 (unidirectionnelle, intentionnel) et enfin condition 5 (bidirectionnelle, intentionnel). Il est important de noter le faible niveau de synchronisation en condition 2 (robot à fréquence fixe). Bien que nous ne puissions pas garantir que les participants n'essayaient pas de se coordonner avec le robot (plutôt que de simplement garder leur rythme), nous pensons qu'ils n'étaient pas intentionnellement synchronisés (en raison du faible niveau de synchronisation). Nous pouvons par conséquent soutenir que l'entraînement rythmique discuté ci-dessus dans les conditions 2 et 3 était bien non-intentionnel. La variance circulaire a montré que la synchronisation était légèrement meilleure dans la condition 3 par rapport à la condition 1 où le robot présentait le même comportement. La distribution de phase relative a révélé d'autre part une stabilité significativement plus élevée du schéma de synchronisation des mouvements dans la condition 3 par rapport à la condition 1. Elle démontre la contribution de l'entraînement bidirectionnel à la coordination interpersonnelle humain/robot. Le même phénomène peut être observé dans des conditions intentionnelles avec une meilleure performance en termes de stabilité de synchronisation dans la condition 5 (bidirectionnelle) par rapport à la condition 4 (unidirectionnelle). La différence est cependant ici moins importante par rapport aux conditions non intentionnelles en raison de la grande capacité des sujets humains à se synchroniser intentionnellement de manière très stable. Le principal résultat à noter ici est que, comme pour la coordination interpersonnelle humain-humain, une meilleure synchronisation est obtenue en cas d'entraînement mutuel et bidirectionnel pour des conditions à la fois non intentionnelles et intentionnelles. En outre et sans surprise, comme dans la coordination

interpersonnelle humain-humain, la coordination intentionnelle humaine est beaucoup plus stable que la coordination non intentionnelle dans les IHR.

Conclusion

L'étude résumé ci-dessus a démontré que les caractéristiques de la coordination interpersonnelle humain-humain peuvent clairement être reproduites et confirmées dans le cas des IHR. Plus précisément, les résultats obtenus ont montré que, comme pour la coordination interpersonnelle humain-humain, lors de l'interaction avec un robot :

- un effet d'entraînement non intentionnel humain est présent
- l'entraînement bidirectionnel apporte plus de stabilité et une meilleure synchronisation pour la coordination tant non intentionnelle qu'intentionnelle
- la coordination intentionnelle est plus forte et plus stable que la coordination non intentionnelle.

Cependant, d'autres questions peuvent être discutées sur la base de nos résultats. Bien que nous ayons démontré l'existence d'un entraînement rythmique non intentionnel humain dans une IHR, cette étude ne détaille pas la manière dont ce phénomène se produit. Par conséquent, nous ne pouvons pas, à ce stade, comparer avec précision nos résultats en IHR avec l'ensemble des aspects caractéristiques de la coordination interpersonnelle humain-humain. En effet, de nombreuses questions peuvent émerger apportant de nombreuses perspectives intéressantes à ce travail. Une plus grande attention doit être accordée aux fréquences préférées des participants humains dans les expériences futures. En effet, comme mentionné plus haut, la littérature a décrit que la meilleure plage pour observer une coordination non intentionnelle est lorsque les deux participants se déplacent à $\pm 10\%$ de leur fréquence préférée [18]. Dans les travaux futurs, nous tâcherons par conséquent de mieux évaluer les fréquences préférées des participants et à contrôler le robot de manière à ce qu'il ne puisse se coordonner que pour une petite plage de temps autour de ces fréquences préférentielles. De cette façon, nous serions plus en mesure de simuler la coordination non intentionnelle du robot et de mieux analyser, par exemple, l'entraînement bidirectionnel dans des conditions où les deux agents (humain et robot) agissent de manière similaire (comportement non intentionnel). De même, comme dans la coordination interpersonnelle humain-humain, nous pourrions mieux analyser les effets des amplitudes des signaux d'entraînement. *Varlet et al. (2012)* ont montré que l'amplitude du stimulus influence l'entraînement non intentionnel [41]. Dans nos expériences, les humains sont entraînés visuellement par le mouvement du bras du robot, ce qui signifie que la taille du robot ou la distance entre le robot et les participants peuvent jouer un rôle sur la force d'entraînement rythmique à travers des variations d'amplitude du flot optique (extrait des séquences d'images) qui dépendent fortement de la distance entre les agents.

À l'avenir, nous pourrions étudier si l'apparence physique (aspect mécanique) du robot peut affecter l'entraînement rythmique dans les IHR. Certaines études ont suggéré que les robots humanoïdes sont plus susceptibles d'avoir une influence motrice sur le

comportement humain [34]. Notre étude ne peut pas répondre à cette question car nous n'avons utilisé qu'un seul type de robot humanoïde. Cependant, nous émettons l'hypothèse que l'apparence physique du robot pourrait ne pas avoir d'impact significatif surtout dans le cas d'un entraînement non intentionnel étant donné que les humains peuvent être entraînés rythmiquement par un simple point mobile [19]. Au contraire, nous soutenons que le comportement moteur et cinématique du robot est extrêmement important. Plus précisément, une coordination interpersonnelle stable a besoin d'un équilibre persistant entre les signaux moteurs et les signaux des senseurs échangés par les agents en interaction. Par conséquent, le modèle computationnel utilisé pour le contrôle sensori-moteur du robot doit être choisi soigneusement.

La présence d'un tel phénomène dans l'interaction humain-robot, comme cela est prouvé ici, doit interroger la manière de modéliser les IHR ou les IHM au sens plus large, notamment dans les cas où les agents artificiels dits « sociaux » sont censés interagir en temps réel avec des partenaires humains. En effet, malgré sa présence et son importance dans les interactions humaines, l'entraînement rythmique non intentionnel n'est presque jamais pris en compte dans les IHR. La plupart des architectures existantes sont basées sur des politiques de contrôle optimales. Très peu incluent des réflexes sensorimoteurs de bas niveau et persistants comme l'entraînement rythmique non intentionnel du contrôleur moteur (par des signaux sensoriels). Nous pensons qu'ajouter aux solutions existantes, de manière prudente, des réflexes sensorimoteurs de bas niveau simulant un entraînement rythmique non intentionnel peut améliorer l'intuitivité de l'IHR.

Bibliographie

- [1] Olivier Oullier, Gonzalo C De Guzman, Kelly J Jantzen, Julien Lagarde et Ja Scott Kelso. "Social coordination dynamics: Measuring human bonding". In: *Social neuroscience* 3.2 (2008), p. 178–192
- [2] Riitta Hari et Miiamaaria V Kujala. "Brain basis of human social interaction: from concepts to brain imaging". In: *Physiological reviews* 89.2 (2009), p. 453–479
- [3] Michael J HOVE et Jane L Risen. "It's all in the timing: Interpersonal synchrony increases affiliation". In: *Social Cognition* 27.6 (2009), p. 949–960
- [4] Frank J Bernieri et Robert Rosenthal. "11. Interpersonal coordination: Behavior matching and interactional synchrony". In: *Fundamentals of nonverbal behavior* 401 (1991)
- [5] William H McNeill. *Keeping together in time*. Harvard University Press, 1997
- [6] Edward W Large. "On synchronizing movements to music". In: *Human Movement Science* 19.4 (2000), p. 527–566
- [7] Daniel C Richardson, Rick Dale et Natasha Z Kirkham. "The art of conversation is coordination common ground and the coupling of eye movements during dialogue". In: *Psychological science* 18.5 (2007), p. 407–413
- [8] Vittorio Gallese, Christian Keysers et Giacomo Rizzolati. "A unifying view of the basis of social cognition". In: *Trends in cognitive sciences* 8.9 (2004), p. 396–403

- [9] Jessica Phillippe-Silver, C Athena Aktipis et Gregory A Bryant. "The ecology of entrainment: Foundations of coordinated rhythmic movement". In: *Music Perception : An Interdisciplinary Journal* 28.1 (2010), p. 3-14
- [10] Martin Clayton, Rebecca Sager et Udo Will. "In time with the music: the concept of entrainment and its significance for ethnomusicology." In: *European meetings in ethnomusicology*. T. 11. Romanian Society for Ethnomusicology. 2005, p. 1-82
- [11] Bernieri, F. J. Coordinated movement and rapport in teacher-student interactions. *Journal Nonverbal Behavior*. 1988; 12(2), 120-138
- [12] Schmidt, R. C., Morr, S., Fitzpatrick, P. A., Richardson, M. J. (2012). Measuring the dynamics of interactional synchrony. *Journal of Nonverbal Behavior*. 2012; 36, 263-279.
- [13] Issartel, J., Marin, L., Cadopi, M. Unintended interpersonal co-ordination. *Neuroscience Letters*. 2007; 411(3), 174-179
- [14] Norman, D. : Cognitive engineering. In: D.A.N..S.W. Draper (ed.) *User Centered System Design : New Perspectives on Human-Computer Interaction*, pp. 31 - 61. CRC Press (1986)
- [15] Malle, B.F., Knobe, J. : The folk concept of intentionality. *Journal of Experimental Social Psychology* 33(2), 101-121 (1997). DOI doi.org/10.1006/jesp.1996.1314
- [16] Schmidt, R. C., O'Brien, B. Evaluating the dynamics of unintended interpersonal coordination. *Ecological Psychology*. 1997; 9(3), 189-206.
- [17] Issartel, J., Marin, L., Cadopi, M. : Unintended interpersonal co-ordination : "can we march to the beat of our own drum?". *Neuroscience Letters* 411(3), 174 - 179 (2007). DOI 10.1016/j.neulet.2006.09.086
- [18] Richardson, M. J., Marsh, K. L., Schmidt, R. C. Effects of visual and verbal interaction on unintentional interpersonal coordination. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 2005; 31, 62-79
- [19] Schmidt, R. C., Richardson, M. J., Arsenault, C., Galantucci, B. Visual tracking and entrainment to an environmental rhythm. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 2007; 33(4), 860.
- [20] Shockley, K., Baker, A., Richardson, M. R., Fowler, C. A. Articulatory constraints on interpersonal postural coordination. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. 2007; 33. 201-8.
- [21] Lenay, C. "It's so touching" : Emotional value in distal contact. *International Journal of Design*. 2010; 4, 15-26.
- [22] Marin, L., Issartel, J., Chaminade, T. Interpersonal motor coordination: From human-human to human-robot interactions. *Interaction Studies*. 2009; 10(3), 479-504.
- [23] von Holst, E. Relative coordination as a phenomenon and as a method of analysis of central nervous functions. *The selected papers of Erich von Holst. The behavioural physiology of animals and man*. 1973; 1, 33-135.
- [24] Schmidt, R. C., Richardson, M. J. Dynamics of interpersonal coordination. In A. Fuchs & V. Jirsa (Eds.), *Coordination: Neural, Behavioral and Social Dynamics*. 2008; pp. 281-308
- [25] Ikegami, T., Iizuka, H. Joint attention and Dynamics repertoire in Coupled Dynamical Recognizers. *AISB 03: Symposium on Imitation in Animals and Artifacts*. 2003; 125-130.

- [26] Hafner, V. V., Kaplan, F. Interpersonal Maps: How to map affordances for interaction behaviors. Proceedings of international conference on Towards affordance-based robot control. 2008; 1-15
- [27] Andry, P., Blanchard, A., Gaussier, P. Using the Rhythm of Nonverbal Human-Robot Interaction as a Signal for Learning functions. IEEE Transaction on Autonomous Mental Development. 2011; 3(4), 30-42
- [28] Prepin, K., Gaussier, P. How an agent can detect and use synchrony parameter of its own interaction with a human? Development of Multimodal Interfaces: Active Listening and Synchrony. 2010; 50-65
- [29] Crick, C., Munz, M., Scassellati, B. Synchronization in social tasks: Robotic drumming. 15th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication. 2006; 97-102
- [30] Rolf, M., Hanheide, M., Rohlfing, K.J. Attention via Synchrony: Making Use of Multimodal Cues in Social Learning. IEEE Transactions on Autonomous Mental Development. 2009; 1(1), 55-67
- [31] Sadouhi, N., Pereira, A., Jain, R., Leite, L., Lehman, J. F. Creating Prosodic Synchrony for a Robot Co-Player in a Speech-Controlled Game for Children. 12th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction. 2017; 91-99.
- [32] Lorenz, T., Weiss, A., Hirche, S. Synchrony and Reciprocity: Key Mechanisms for Social Companion Robots in Therapy and Care. Int J of Soc Robotics. 2016; 8, 125-143
- [33] Kilner, J. M., Paulignan, Y., Blakemore, S. J. An interference effect of observed biological movement on action. Current Biology. 2003; 13(6), 522-525.
- [34] Oztop, E., Franklin, D., Chaminade, T., Gordon, C. Human-humanoid interaction: is a humanoid robot perceived as a human? International Journal of Humanoid Robotics. 2005; 2(4), 537-559.
- [35] Shen, Q., Kose-Bagci, H., Saunders, J., Dautenhahn, K. The impact of participants' beliefs on motor interference and motor coordination in human-humanoid interactions. IEEE Transactions on Autonomous Mental Development. 2011; 3, 6-16.
- [36] Avrunin, E., Ashley Douglas, J. H., Scassellati, B. Effects related to synchrony and repertoire in perceptions of robot dance. In Proceedings of the 6th international conference on Human-robot interaction (HRI). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA. 2011; 93-100.
- [37] Lehmann, H., Saez-Pons, J., Syrdal, D.S., Dautenhahn, K. In Good Company? Perception of Movement Synchrony of a Non-Anthropomorphic Robot. PLoS ONE. 2015; 10(5) : e0127747
- [38] Hasnain, S.P., Mostafaoui, G., Gaussier, P. A synchrony-based perspective for partner selection and attentional mechanism in human-robot interaction. Paladyn Journal of Behavioral Robotics. 2012; 3(3), 156-171
- [39] Ghiles Mostafaoui, R. C. Schmidt, Syed Khursheed Hasnain, Robin Salesse, Ludovic Marin, Human Unintentional and Intentional interpersonal coordination in interaction with a Humanoid Robot, Plos One 2021 (a paraître)
- [40] Schmidt, R. C., Carello, C., Turvey, M. T. Phase transitions and critical fluctuations in the visual coordination of rhythmic movements between people. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance. 1990; 16(2), 227.

[41] Varlet, M., Coey, C. A., Schmidt, R. C., Richardson, M. J. Influence of stimulus amplitude on unintended visuomotor entrainment. *Human Movement Science*. 2012; 31(3), 541-552.