



HAL
open science

Exploitation du mouvement du robot pour améliorer la conscience de situation dans la collaboration

humain-robot

Benjamin Cambor

► To cite this version:

Benjamin Cambor. Exploitation du mouvement du robot pour améliorer la conscience de situation dans la collaboration humain-robot. Robotique [cs.RO]. Université de Bordeaux, 2024. Français. NNT : 2024BORD0069 . tel-04573182

HAL Id: tel-04573182

<https://theses.hal.science/tel-04573182>

Submitted on 13 May 2024

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



THÈSE PRÉSENTÉE
POUR OBTENIR LE GRADE DE
DOCTEUR
DE L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

École doctorale sciences physiques et de l'ingénieur
Automatique, Productique, Signal et Image, Ingénierie Cognitive

Par Benjamin Cambior

**Exploitation du mouvement du robot pour améliorer la
conscience de la situation dans la collaboration humain-robot**

Sous la direction de : **Jean-Marc SALOTTI et David DANÉY**

Soutenue le 18 avril 2024

Membres du jury :

M. Mickael CAUSSE	Enseignant-chercheur	ISAE Toulouse	Rapporteur
Mme. Anne SPALANZANI	Professeure des universités	Université de Grenoble	Rapportrice
Mme. Hélène SAUZEON	Professeure des universités	Université de Bordeaux	Examinatrice
Mme. Aurélie CLODIC	Ingénieur de recherche	LAAS Toulouse	Examinatrice
Mme. Aurélie LANDRY	Maîtresse de conférences	Université de Grenoble	Examinatrice
M. Jean-Marc SALOTTI	Professeur des universités	Bordeaux INP	Directeur
M. David DANÉY	Directeur de Recherche	Inria	Co-directeur

Remerciements

Ces trois ans et demi de thèse ont pu être rudes par moments. Heureusement, j'ai eu la chance d'être très bien entouré tant professionnellement que dans ma vie personnelle par de nombreuses personnes. Je tiens donc à tous les remercier pour leur présence.

Tout d'abord, je souhaite adresser mes remerciements aux membres du jury. Merci à Anne Spalanzani et Mickaël Causse d'avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse. Je remercie également Hélène Sauzéon, Aurélie Clodic et Aurélie Landry d'avoir accepté d'être examinatrices de mes travaux de thèse. Je vous remercie pour vos retours et vos suggestions qui permettent d'améliorer la qualité de ce manuscrit.

Ensuite, je tiens à remercier mes deux directeurs de thèse sans qui ce travail n'aurait pas pu être possible. Merci Jean-Marc et David d'avoir tout fait pour que je puisse faire cette thèse avec vous. Je vous suis très reconnaissant d'avoir toujours été à l'écoute de mes idées et de m'avoir laissé une grande autonomie dans mes travaux de thèse. Vos remarques, vos questions et vos suggestions ont toujours été très enrichissantes. Je vous remercie aussi pour toutes ces discussions plus légères et rigolotes que nous avons en réunions. J'espère sincèrement que nous aurons de nouvelles occasions de travailler ensemble par la suite.

Je souhaite également adresser mes remerciements à toute l'équipe Auctus, et en particulier aux permanents. Merci d'avoir vous aussi été à l'écoute et pour l'ensemble de vos conseils. Merci Margot pour les discussions scientifiques et d'avenir post-doctoral que nous avons partagées. Merci Vincent pour toutes les discussions que l'on a eues, scientifiques ou non, tes blagues et tous tes jeux de mots. Merci Nasser pour tes conseils et ton aide quand je me perdais dans les statistiques. Grand merci à Lucas d'avoir permis à mes expériences d'être mise en place et de fonctionner. Je remercie également les assistantes de recherches de l'équipe, Chrystel et Nathalie.

Je veux aussi remercier tous les doctorants, post-doctorants et ingénieurs de l'équipe qui ont fait, ou font encore partie de l'équipe Auctus. Merci Charles de m'avoir fait rencontrer l'équipe et d'avoir supervisé mon stage de master. Merci aux premiers doctorants de l'équipe Jessica, Nicolas et Antun pour vos conseils lors de la rédaction de cette thèse. Merci Nassim pour les discussions café et l'expérimentation que nous avons mis en place ensemble. Merci Erwann de nous avoir fait rire chaque semaine avec tes problèmes de voiture. Merci au rire d'Erwann de l'accompagner partout où il va, et ce, en toute discrétion. Merci à Loic, Elio et Ahmed, pour les discussions scientifiques ou non, je vous souhaite bon courage pour la suite de vos travaux de thèses, ou d'ingénierie ! Merci Vincent F. pour ton passage dans l'équipe, tu nous auras bien fait rire dans le bureau. Merci Alexis pour tous tes montages photo et pour tous ces moments drôles qui sont arrivés dans le bureau. Pour finir, merci Gautier pour toutes les discussions que nous avons eues pendant les (nombreuses) pauses. Je ne comprends toujours pas tout ce que tu me racontes quand tu me parles des polytopes, mais c'est toujours passionnant de t'écouter parler de maths. Je remercie également les stagiaires qui ont participé à mes travaux de recherches. Merci Lucas et Cléo d'avoir travaillé sur le premier protocole expérimental avec moi. Merci Axel de m'avoir assisté pendant les passations expérimentales du second protocole.

Merci à Florian qui a été mon coloc pendant plus de la moitié de cette thèse. Merci d'être là depuis la L2 et d'être toujours aussi drôle. Merci pour tous ces bons moments à l'appart qui ont contribué à rendre cette thèse moins éprouvante. Bon courage pour la suite de ta thèse, j'ai hâte de la lire et d'assister à ta soutenance. Je profite de ces remerciements pour te rappeler que tu

m'as jamais mis de perfect à Mario Kart. Je remercie aussi Houssam, que je vois sans doute trop peu, mais qui a toujours été là lui aussi. On a un record à battre tous les trois. Merci à Sam et Jeanne, le S, pour tout votre soutien et pour notre amour commun du vin, des confessions et des discussions. Vous savez déjà tous les deux que je vous aime énormément, malgré votre lubie des soirées déguisées. Merci Isa et Anaïs, pour beaucoup de choses, notamment de m'avoir ouvert la porte de votre appart et prêter deux fauteuils ou un canapé pour dormir. Merci vous aussi d'être là depuis tout ce temps, j'espère que cela continuera dans les prochaines années. Je vous souhaite bon courage pour la fin de vos thèses à vous aussi. Merci Maëva, la parisienne de l'équipe, de repasser voir tes copains de Bordeaux de temps en temps. Ça me fait toujours très plaisir de te voir pour faire la fête. Comment parler de fête sans remercier les Fils. Merci Sam (encore), Louis (le nouveau), PAL (le crypté), Flo (le plus drôle de la bande), Antho (le rageux) et Lambert (la drama). Merci pour tout ces fous rires et ces soirées depuis MIASHS. J'espère que nous pourrons continuer à passer de tels moments ensemble plus tard. Je tiens aussi à remercier Nathan, Jérôme et Simon que je vois beaucoup trop peu mais qui sont toujours là depuis presque 10 ans.

Je remercie également ma famille de m'avoir toujours soutenu et encouragé pendant ces longues années d'études. Merci à mes parents pour leur amour, mes frères, Rémy et Frédéric ainsi que leurs conjointes Claudia et Lydia. Merci à ma nièce Naïa et mon neveu Luca. Merci à ma grand-mère qui ne comprend pas tout à fait ce que je fais, mais qui, je sais, est fière de moi. J'adresse également une pensée à mes grands-pères et ma grand-mère.

Pour finir, je remercie Léa pour sa présence à mes côtés. Ma pudeur m'oblige à ne pas trop m'étaler, mais merci de m'avoir écouté parler et râler très souvent. Merci de m'avoir fait rire et de m'avoir changé les idées à chaque fois que j'en avais besoin. Tu m'as toujours poussé à me donner à fond et à aller au bout de ce travail. J'espère que tu garderas ton grain de folie pendant encore longtemps. Merci d'être toi et de m'avoir accompagné pendant une longue partie de cette thèse, je t'aime.

Exploitation du mouvement du robot pour améliorer la conscience de la situation dans la collaboration humain-robot

Résumé : Un enjeu de l'usine du futur est de préserver la santé et le confort des opérateurs tout en améliorant leur productivité. La robotique collaborative est une solution qui permet, par une assistance appropriée, de focaliser l'opérateur sur les tâches dont il a l'expertise, tout en déléguant les charges et contraintes à un robot collaboratif. On parle ici de combiner les qualités des robots industriels (fortes capacités physiques, répétabilité, force, endurance, vitesse, etc) et celles des humains (variabilité, réactions face à l'incertitude).

Ce travail de recherche s'inscrit dans le cadre du projet ANR Pacbot (ANR-20-CE10-0005). L'objectif général du projet est de concevoir un système cobotique semi-autonome pour l'assistance, capable de choisir, de synchroniser et de coordonner des tâches réparties entre l'humain et le robot en s'adaptant à différents types de variabilité des gestes professionnels, tout en anticipant des situations dangereuses. Ce système a notamment pour vocation d'ordonner les tâches en minimisant le risque d'erreurs humaines. L'étude du facteur humain dans les milieux industriels a montré que la majorité des accidents étaient due à des erreurs humaines ou de prises de décisions. Ces dernières seraient, dans la majorité des cas, causées par une mauvaise conscience de situation des opérateurs.

Cette thèse propose d'utiliser le mouvement du robot comme un moyen de communication qui soutient la conscience de la situation d'un humain dans la collaboration humain-robot. Un des points importants de notre contribution est que ces mouvements, que nous appelons *mouvements de signalisation*, peuvent être générés tout en permettant au robot de réaliser des actions grâce à la redondance de ses articulations. Le choix du mouvement comme moyen de communication est inspiré d'une analyse d'accidents de robotique industrielle. Cette analyse a mis en évidence plusieurs schémas semblables d'accidents en lien avec une mauvaise conscience de la situation. A l'aide de l'identification des risques d'erreurs humaines observés, le choix d'utiliser le robot comme un canal de communication à part entière semble être une solution prometteuse de prévention d'accidents et de sécurité.

Nous avons observé un effet bénéfique des mouvements de signalisation sur la conscience de la situation dans deux études expérimentales. Dans la première étude, nous avons montré qu'ils permettent à un robot collaboratif de communiquer à propos de son état ou de ses actions avec ses partenaires humains et ainsi de le ré-introduire dans la boucle d'action du robot. Dans la seconde étude, nous avons proposé leur utilisation pour attirer l'attention d'un humain et l'extraire de situations accidentogènes. Aussi, nous avons montré que le non mouvement pouvait aussi être considéré comme un moyen de communication efficace. Enfin, nous avons proposé des recommandations pour la conception et le choix des mouvements à générer en fonction des différents types de contextes.

Mots-clés : Conscience de la situation, Collaboration Humain-Robot, Communication, Action Jointe

Exploiting robot motion to improve situation awareness in human-robot collaboration

Abstract : One of the challenges of Industry 4.0 is to preserve the health and comfort of operators while improving their productivity. Collaborative robotics is a solution which, through appropriate assistance, enables the operator to focus on tasks for which he has expertise, while delegating loads and constraints to a collaborative robot. This involves combining the strengths of industrial robots (high physical capacity, repeatability, strength, endurance, speed, etc.) with those of humans (variability, reactions to uncertainty).

This research work is part of the ANR Pacbot project (ANR-20-CE10-0005). The overall aim of the project is to design a semi-autonomous cobotic system for assistance, capable of selecting, synchronizing and coordinating tasks distributed between human and robot, adapting to different types of variability in professional gestures, while anticipating dangerous situations. In particular, this system is designed to schedule tasks while minimizing the risk of human error. The study of the human factor in industrial environments has shown that the majority of accidents are due to human error or decision-making. In most cases, the latter are caused by operators poor situation awareness.

This thesis proposes to use robot motion as a means of communication that supports human situation awareness in human-robot collaboration. One of the important points of our contribution is that these movements, referred to as *signaling motions*, can be generated while enabling the robot to perform actions thanks to the redundancy of its joints. The choice of motion as a means of communication was inspired by an analysis of industrial robotics accidents. This analysis highlighted a number of similar accident patterns linked to poor situational awareness. By identifying the risks of human error observed, the choice of using the robot as a communication channel in its own right appears to be a promising accident prevention and safety solution.

A beneficial effect of signaling motions on situation awareness has been observed in two experimental studies. In the first study, we showed that they enable a collaborative robot to communicate about its state or actions with its human partners, and thus reintroduce them into the robot's action loop. In the second study, we proposed their use to attract a human's attention and extract him/her from accident-prone situations. We also argued that non-motion could also be considered an effective means of communication. Finally, recommendations were proposed for the design and choice of motion to be generated in different types of context.

Keywords : Situation Awareness, Human-Robot Collaboration, Communication, Joint Action

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	iii
Table des figures	x
Liste des tableaux	xi
Liste d'abréviations	xii
Introduction	1
Contexte	1
Problématiques et objectifs généraux	4
Contributions et liste des publications	6
1 Modélisation de la conscience de situation en collaboration humain-robot	9
Introduction	10
1.1 De la robotique industrielle à la robotique collaborative	10
1.1.1 La robotique industrielle	10
1.1.2 Les robots collaboratifs	12
1.1.3 Interaction et Collaboration Humain-Robot	14
1.1.4 L'Interaction Cognitive Humain-Robot	16
1.1.5 Conclusion intermédiaire	17
1.2 Action Jointe et robotique collaborative	18
1.2.1 La théorie de l'action jointe	18
1.2.2 Action jointe et interaction humain-robot	20
1.2.3 Les moyens de communication de l'intention du robot à l'humain	22
1.2.3.1 Le canal auditif	23
1.2.3.2 Le canal tactile	23
1.2.3.3 Le canal visuel	23
1.2.4 Conclusion intermédiaire	24
1.3 La conscience de situation	24
1.3.1 Définitions	24
1.3.2 Les mécanismes cognitifs impliqués dans la conscience de situation	27
1.3.3 Les démons de la conscience de situation	28
1.3.4 Méthode de mesures de la conscience de situation	28
1.3.4.1 Questionnaires de mesures de la conscience de situation	29
1.3.4.2 Mesures comportementales et physiologiques de la conscience de situation	30
1.3.5 Conscience de situation d'équipe	30
1.3.6 Conclusion intermédiaire	32
1.4 Prise en compte de la conscience de situation dans l'interaction et la collaboration Humain-Robot	33
1.4.1 Conscience de situation et Interaction Humain-Robot	33
1.4.2 Proposition d'un modèle de prise en compte de la conscience de situation par un robot	35
Conclusion	37

2	Accidents de robotique industrielle et manque de conscience de situation	39
	Introduction	39
2.1	Interaction à risque entre l’humain et le robot	41
2.1.1	Défauts de sécurité en robotique industrielle	41
2.1.2	Le lien entre l’erreur humaine et la conscience de situation	42
2.1.3	Conscience de situation et analyse des accidents	43
2.1.4	Objectif et hypothèses	44
2.2	Méthode d’analyse des rapports d’accidents	44
2.2.1	La base de données EPICEA	44
2.2.2	Méthode d’analyse des rapports	44
2.2.3	Identification des démons	45
2.2.4	Exemple d’analyse d’un rapport	45
2.2.4.1	Division en phases	46
2.2.4.2	Analyse avec les démons de la conscience de situation	46
2.3	Résultats de l’analyse d’accidents	46
2.3.1	Les manifestations des démons de la conscience de situation	46
2.3.2	Séquences de démons de la conscience de situation dans ces accidents	47
2.4	Discussion	48
2.4.1	Démons de la conscience de situation et accidents de robotique industrielle	48
2.4.2	Schémas d’apparition des démons en robotique industrielle	50
2.4.3	Limites de l’étude	51
	Conclusion	51
3	Le mouvement du robot comme vecteur de communication pour soutenir la conscience de situation	53
	Introduction	54
3.1	Les mouvements d’un robot comme moyen de communication	55
3.1.1	Moyens de communication d’un robot avec un humain	55
3.1.2	Les mouvements de signalisation	57
3.1.2.1	Génération de mouvements de signalisation	58
3.1.2.2	Mouvements de signalisation d’état	59
3.1.2.3	Mouvements de signalisation d’action	60
3.1.3	Objectif et hypothèses	60
3.2	Méthode expérimentale	61
3.2.1	Contexte de l’expérimentation	61
3.2.2	Participants	61
3.2.3	Tâche de découpe du bois simulée	62
3.2.4	Matériel et dispositif expérimental	63
3.2.4.1	Cobot 1 - Mouvement de signalisation d’action	63
3.2.4.2	Cobot 2 - Mouvement de signalisation d’état	64
3.2.5	Déroulement de l’expérimentation	65
3.2.6	Variables indépendantes étudiées	66
3.2.6.1	La modalité du fléchissement	66
3.2.6.2	Résistance générée par le Cobot 1	67
3.2.6.3	Comportements du Cobot 2	68
3.2.7	Variables dépendantes mesurées	68
3.2.8	Hypothèses opérationnelles	69
3.3	Analyse des résultats	69

3.3.1	Effet de la modalité de fléchissement et de la résistance du Cobot 1 sur le temps	70
3.3.1.1	Effet de la modalité de fléchissement sur le temps	70
3.3.1.2	Effet de la résistance sur le temps	71
3.3.1.3	Effet de l'interaction de la modalité et de la résistance sur le temps	71
3.3.2	Effet de la modalité de fléchissement et de la résistance du Cobot 1 sur la force	71
3.3.2.1	Effet de la modalité de fléchissement sur la force	71
3.3.2.2	Effet de la résistance sur la force	72
3.3.2.3	Effet de l'interaction de la modalité et de la résistance sur la force	72
3.3.3	Effet de la modalité de fléchissement sur le questionnaire SART	73
3.3.4	Effet du comportement du Cobot 2 sur la distance de passage	74
3.4	Discussion	75
3.4.1	Mouvement d'action et maintien dans la boucle d'action du robot	75
3.4.2	Mouvement d'état et soutien au modèle mental de l'individu	75
3.4.3	Saillance des mouvements de signalisation	76
3.4.4	Limites	77
Conclusion	. . . . .	78

4 Étude de l'effet des mouvements de signalisation et des capacités de projection sur le partage d'attention 80

Introduction	. . . . .	81
4.1	Influence des capacité de projection sur le partage d'attention	82
4.1.1	Capacité de projection dans le modèle de la conscience de situation	82
4.1.2	Capacités attentionnelles dans la coopération humain-robot	83
4.1.3	Hypothèses théoriques	84
4.2	Méthode expérimentale	85
4.2.1	Contexte de l'expérimentation	85
4.2.2	Participants	86
4.2.3	Tâches accomplies pendant l'expérimentation	86
4.2.3.1	Jeu des Tours de Hanoï	86
4.2.3.2	Tâche de construction de coopération	87
4.2.4	Matériel et dispositif expérimental	87
4.2.5	Déroulement de l'expérimentation	90
4.2.6	Variables indépendantes étudiées	92
4.2.6.1	Ordre de passage	92
4.2.6.2	Modalités expérimentale	92
4.2.6.3	Actions à effectuer	92
4.2.7	Variables dépendantes mesurées	92
4.2.8	Hypothèses opérationnelles	93
4.3	Analyse des résultats	93
4.3.1	Effet de l'ordre de passage de l'expérimentation	94
4.3.2	Effet de la capacité de projection sur le temps d'attente du robot	94
4.3.3	Effet de l'implication dans les tâches sur la conscience de situation des participants	94
4.3.3.1	Effet de l'implication dans les tâches sur le taux de regards	94

4.3.3.2	Effet de l'implication dans les tâches sur le score obtenu au questionnaire SART	95
4.3.4	Effet du mouvement de respiration sur la réactivité des participants . . .	96
4.4	Discussion des résultats obtenus	97
4.4.1	Lien entre la capacité de projection de la conscience de situation et la performance	98
4.4.2	Impact de l'implication dans les tâches sur l'évaluation de la conscience de situation	99
4.4.3	Effet du mouvement de respiration sur l'attention	101
4.4.4	Limites de l'expérimentation mise en place	101
Conclusion	. . . . .	102
5	La saillance des mouvements de signalisation	104
Introduction	. . . . .	104
5.1	Synthèse comparative des deux expérimentations	105
5.2	Influence du mode d'interaction entre l'humain et le robot	107
5.3	Influence de la dynamique de l'environnement de travail	108
5.4	Influence du choix du mouvement	110
5.5	Recommandations pour la conception de mouvements de signalisation	112
Conclusion	. . . . .	113
Conclusion et perspectives		115
Conclusion	. . . . .	115
Perspectives	. . . . .	119
Annexes		140
A	Questionnaire SART	141
B	Questionnaire NASA-TLX	142

Table des figures

0.1	Photo d'une boîte à gant de chimie de l'entreprise Solvay	3
1.1	Photo d'un robot industriel	11
1.2	Photographie du premier prototype de cobot proposé par Colgate et al. (1996) .	12
1.3	Photographie d'un robot collaboratif Panda fabriqué par l'entreprise Franka Emika	13
1.4	Exemple de modèle de système robotique	14
1.5	Modèle d'espace de travail cobotisé	15
1.6	Spectre d'interaction entre un humain et un système robotique	16
1.7	Action jointe pour déplacer un meuble	18
1.8	Conception d'une activité de collaboration pour chaque partenaire	19
1.9	Mécanismes d'un robot impliqués pour mener à une action jointe	21
1.10	Communication du robot à l'humain	22
1.11	Modèle simplifié de la CS	25
1.12	Modèle détaillé de la CS	26
1.13	CS d'équipe et CS partagée	31
1.14	Modèle de transparence des agents basé sur la conscience de situation	35
1.15	Modèle de prise en compte de la conscience de situation par un robot	36
2.1	Schémas de séquences d'apparition de démons de la conscience de situation dédiés de l'analyse des accidents	48
2.2	Schémas revus des séquences d'apparition de démons de la conscience de situation	50
3.1	Mouvements fonctionnel, prévisible et lisible	57
3.2	Robot Panda de Franka Emika et sa configuration articulaire	58
3.3	Redondance du robot Panda de Franka Emika	59
3.4	Dispositif expérimental	62
3.5	Vue de la salle expérimentale	64
3.6	Mouvement de fléchissement	65
3.7	Représentation de la zone de danger du Cobot 2	66
3.8	Exemple du mouvement de respiration	67
3.9	Déroulé de la première expérimentation	67
3.10	Diagramme en boîte du temps mesuré pour chaque modalité du mouvement de fléchissement et pour chaque résistance.	70
3.11	Diagramme en boîte de la force mesurée pour chaque modalité du mouvement de fléchissement et pour chaque résistance.	72
3.12	Diagramme en boîte du score SART calculé pour chaque modalité du mouve- ment de fléchissement.	73
3.13	Diagramme en boîte de la distance mesurée pour chaque modalité du mouve- ment de Respiration.	74

3.14	Inter-différence du temps pour chaque résistance entre chaque modalité. La ligne pointillée bleue correspond au premier essai des modalités OFF, ON Non expliqué et ON Expliqué. La ligne pointillée orange correspond au dernier essai des modalités OFF, ON Non expliqué et ON Expliqué.	77
4.1	Modèle simplifié de la CS	82
4.2	Diagramme des tâches de l'humain et du robot au cours de chaque phase	86
4.3	Exemple d'une séquence de don	88
4.4	Exemple d'une séquence de retrait	89
4.5	Lunettes Pupil Core	90
4.6	Dispositif expérimental	91
4.7	Déroulé de la deuxième expérimentation	91
4.8	Diagramme en boîte des temps d'attente mesurés pour chaque action	95
4.9	Diagramme en boîte des taux de regard mesurés à l'intérieur de la surface d'intérêt humaine pour chaque modalité	96
4.10	Diagramme en boîte des taux de regard mesurés à l'intérieur de la surface d'intérêt de Robot pour chaque modalité	97
4.11	Diagramme en boîte des scores SART calculés pour chaque modalité	98
4.12	Diagramme en boîte des temps d'attente mesurés pour le don pour chaque modalité	99
4.13	Diagramme en boîte des temps d'attente mesurés pour le retrait pour chaque modalité	100
5.1	Mouvement de fléchissement mis en œuvre dans la première expérimentation	105
5.2	Exemple du mouvement de respiration mis en œuvre dans les deux expérimentations	106
5.3	Schémas des séquences d'apparition de démons de la conscience de la situation présentés en chapitre 2	106
5.4	Placement des participant par rapport au robot dans la première expérience	107
5.5	Placement du robot par rapport au participant dans la deuxième expérience	109
5.6	Posture d'attente du robot dans la deuxième expérience	111
6.1	Modèle de prise en compte de la conscience de situation par un robot proposé dans le chapitre 1	116

Liste des tableaux

2.1	Occurrences des démons de la conscience de situation pour chaque accident de la base de données EPICEA.	47
4.1	Corrélation entre le SART et les autres mesures objectives.	96

Liste d'abréviations

CHR collaboration humain-robot.

cHRI cognitive Human-Robot Interaction.

CS conscience de la situation.

EDA activité électrodermale.

EEG électroencéphalographie.

EPICEA Etudes de prévention par l'informatisation des comptes-rendus d'enquêtes d'accidents.

HRV variabilité du rythme cardiaque.

IHM interaction humain-machine.

IHR interaction humain-robot.

INRS Institut National de Recherche et de Sécurité.

pHRI physical Human-Robot Interaction.

SAGAT Situation Awareness Global Assessment Technique.

SART Situation Awareness Rating Technique.

Introduction

Table des matières

Contexte	1
Problématiques et objectifs généraux	4
Contributions et liste des publications	6

Contexte général de la thèse

L'interaction humain-robot (IHR) est le domaine scientifique consacré à la compréhension, à la conception et à l'évaluation de systèmes robotiques destinés à être utilisés par ou avec des êtres humains (Goodrich et al., 2008). Bartneck et al. définissent l'IHR comme l'étude de la manière dont les robots interagissent avec les personnes dans le monde social (Bartneck et al., 2020). Le domaine se différencie de la robotique, dont l'objectif est de concevoir des robots et d'étudier la façon dont ces derniers agissent dans le monde physique. L'interaction humain-robot est à l'intersection de différents domaines comme l'interaction humain-machine (IHM), l'intelligence artificielle, le traitement du langage naturel, l'ergonomie, la psychologie, les sciences cognitives, la communication et bien sûr, la robotique. Au sein du domaine, les travaux réalisés sont le fruit de cette pluridisciplinarité mais aussi de nouveaux concepts, recherches et méthodes apparus grâce aux systèmes complexes que sont les robots. Un aspect majeur de l'IHR concerne la diversité d'environnements dans lesquels les robots peuvent évoluer. Chacun de ces types d'environnement est synonyme d'une variété de problématiques associées. Les enjeux et les moyens d'interaction ne seront pas les mêmes pour un robot industriel que pour un robot de service ou un robot thérapeutique par exemple. En conséquence, des champs de recherches se sont précisés au fil des années, parmi lesquels nous retrouvons la robotique collaborative, ou collaboration humain-robot (CHR), qui est le domaine d'application dans lequel cette thèse s'inscrit.

La collaboration humain-robot, est le domaine issu du besoin de rendre l'automatisation industrielle davantage flexible en ré-introduisant des humains dans la boucle du processus de production de masse. Il s'agit de combiner les qualités des robots industriels (fortes capacités physiques, répétabilité, force, endurance, vitesse, etc.) et celles des humains (variabilité, réactions face à l'incertitude, etc.). L'objectif, prometteur, est de permettre aux cobots (mot-valise issu de coopération et robot), et aux humains d'opérer conjointement, c'est à dire dans un même espace de travail, pour accomplir des tâches en collaboration (Colgate et al., 1996).

Un moyen d'atteindre cet objectif de partage d'espace de travail et de tâches entre humains et robots est de s'inspirer des interactions entre humains pour accomplir des actions jointes

(Bratman, 1992; Sebanz et al., 2006). Ces dernières sont considérées comme toute forme d'interaction sociale par laquelle deux individus ou plus coordonnent leurs actions dans le temps et dans l'espace afin de provoquer un changement dans l'environnement (Sebanz et al., 2006). Cela nécessite que les individus soient capables de partager des représentations, prédire des actions et d'intégrer les effets prévus de leurs propres actions et de celles de leurs partenaires. Le robot peut être envisagé comme un soutien de ces différents mécanismes cognitifs du partenaire humain, et ce, en suivant le principe de transparence (Alonso & De La Puente, 2018; Chakraborti et al., 2019). Il est considéré qu'un humain en interaction avec un robot dit « transparent » a connaissance, à tout moment de l'interaction, de ce que fait le robot, pourquoi il le fait et ce qu'il fera ensuite. Cela peut notamment être fait au travers de la communication du robot vers l'humain.

Cependant, rendre possible le partage d'espace de travail entre humains et robots ne peut pas se faire aussi simplement sans faire émerger de nombreuses problématiques jusqu'à présent peu rencontrées dans des environnements de tâches automatisées. En effet, l'envergure des robots industriels et leur dangerosité faisaient que ces robots étaient enfermés dans des cages constituées de barrières physiques et de capteurs de sécurité, réduisant à zéro quelque potentielle interaction. Comme nous le verrons, l'isolement de ces robots n'a pas pour autant empêché des accidents de se produire. Le déploiement des robots collaboratifs dans l'industrie nécessite alors de porter une attention particulière aux aspects de sécurité. Les interactions pouvant être de nature physique, cognitive ou les deux à la fois, nécessitent de favoriser des conditions sûres et sans risques pour les opérateurs. L'étude du facteur humain dans les milieux industriels a montré que la majorité des accidents étaient due à des erreurs humaines ou de prises de décisions (Endsley, 1995b). Ces dernières seraient en majeure partie dues à une mauvaise conscience de la situation (CS) des opérateurs (Jones & Endsley, 1996).

La conscience de la situation (CS), ou *Situation Awareness* en anglais, correspond à « *la connaissance de ce qu'il se passe autour de soi* » (traduit de Endsley (1995b)). Dans la littérature scientifique, la définition communément adoptée est la suivante : « *la perception des éléments de l'environnement dans un volume de temps et d'espace, la compréhension de leur signification, et la projection de leur statut dans un futur proche* » (traduit de Endsley (1995b)). Bien que cette définition puisse paraître vague, il est important de préciser ici que le terme de « conscience » fait référence à un état de connaissance. L'étude de la CS dans des domaines tels que l'aviation ou la conduite automobile a mis en évidence son influence dans le processus de prise de décision humaine. Favoriser la CS d'une personne aurait pour effet de renforcer ses conditions de sécurité dans les environnements dynamiques. Étudier l'effet de la prise en compte de la CS ne semble alors pas inopiné dans le contexte de la collaboration humain-robot.

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet ANR Pacbot (ANR-20-CE10-0005), issu d'une collaboration entre des chercheurs en robotique, en informatique, en psychologie du travail et en ergonomie. L'objectif général du projet est de concevoir un système cobotique semi-autonome pour l'assistance, capable de choisir, de synchroniser et de coordonner des tâches réparties entre l'humain et le robot en s'adaptant à différents types de variabilité des gestes professionnels, tout en anticipant des situations dangereuses. L'orchestration des tâches entre l'homme et le robot est difficile car elle doit répondre à la question de la répartition des rôles au sein du couple en fonction des aptitudes, des contraintes physiques et décisionnelles ainsi que des conséquences de leurs interactions. Un point important concerne le fait que c'est au robot de s'adapter au travail d'un opérateur et, plus précisément, à ses stratégies motrices et cognitives. D'un autre côté, l'intérêt même du robot est d'assister l'opérateur dans ses phases de fragilité en préservant

son intégrité physique et mentale, notamment en considérant que l'erreur humaine est inhérente à l'action de l'opérateur.

L'objectif scientifique du projet est de développer des algorithmes capables de construire des plans (séquences de décisions) prenant en compte les variabilités intra-personnelles des opérateurs. La planification est utilisée comme moteur de décision à la fois pour prédire le comportement de l'opérateur et pour décider des actions que le cobot doit réaliser. Un point important dont il faut tenir compte concerne les sources de variabilité favorables à la santé et à la performance au travail. D'autre part, il faut pouvoir garantir l'acceptabilité sociale du cobot par une conception intégrant pleinement l'expérience utilisateur. Le point d'équilibre entre une assistance réactive et adaptée et une assistance préservante est obtenue en considérant les facteurs humains. Concrètement, il est question de limiter les erreurs humaines en lien avec une mauvaise CS. Une originalité de Pacbot est de proposer l'intégration d'un critère de risque associé à une diminution potentielle de la CS du partenaire humain dans le processus de planification des tâches. Les contributions méthodologiques et techniques produites dans le cadre du projet ont pour but d'être démontrée par un prototype d'un poste de travail cobotisé dans une situation de CHR au sein d'une boîte à gant (voir figure 0.1) pour la manipulation de produits chimiques de l'entreprise Solvay.



FIGURE 0.1 – Photo d'une boîte à gant de chimie de l'entreprise Solvay sur la page web *Le Laboratoire du Futur* (<https://www.solvay.fr/implantations/bordeaux-recherche>).

Typiquement, un exemple classique de protocole au sein d'une boîte à gant consiste en 6 phases : préparation de l'expérience, distribution d'un principe actif dans des tubes à essai (par exemple une poudre), distribution d'un solvant, agitation de chaque tube, analyse, fin d'expérience (rangement, éteindre les appareils, etc.). Un opérateur manipule un contenant (par exemple un vial) au sein duquel un principe actif et un solvant sont dosés, mélangés, traités. Après ces étapes, la réaction obtenue est analysée. En terme robotique, le vial, les flacons contenant les principes actifs et les bouteilles de solvants sont :

1. déplacés dans différents endroits au sein de la boîte à gant (rack sur étagère, paillasse, plaque chauffante, agitateur, devant un appareil photo pour analyse);
2. manipulés (ex : ouvert ou fermé, agité, etc.);

3. en interaction avec des appareils (plaque chauffante, balance, appareil photo).

L'application de ces protocoles peut être pénible (gants, espace de travail contraignant), complexe (nécessite un savoir-faire) et répétitif (selon le nombre de mélanges etc.). Néanmoins, ces tâches ne peuvent être automatisées car les séries ne sont pas suffisantes pour être économiquement viables ou comportent trop de variations. La cobotisation est alors la solution privilégiée pour sa flexibilité et sa versatilité. Le robot, en interaction avec l'environnement et l'opérateur, sert ici d'assistant physique et cognitif, pour l'orchestration des tâches.

Le cas étudié est spécifique aux problématiques de Solvay (représentant l'industrie chimique), à la sécurisation, l'orchestration, la synchronisation de tâches potentiellement dangereuses et à l'augmentation du confort physique et cognitif de l'opérateur. Il est pertinent pour mettre en valeur les apports de Pacbot d'autant plus que la problématique est liée à des difficultés d'application peu étudiées mais porteuses pour la cobotique. Elle est associée à des tâches de manipulations partagées laissant la libre expression de l'expertise métier à l'opérateur dans un environnement contraint, encombré et dangereux.

Problématique et objectifs généraux

L'objectif général de cette thèse est d'étudier l'effet de la communication, en particulier non-verbale, pour soutenir la conscience de la situation d'individus dans la collaboration humain-robot.

Ce manuscrit débute, dans le chapitre 1, par un état de l'art des différents concepts étudiés dans ce travail de recherche. Nous commencerons par expliquer ce qu'est la robotique collaborative, ses enjeux et ce qu'elle apporte à la robotique industrielle. Nous verrons ensuite que la collaboration humain-robot peut s'inspirer des interactions entre humains lorsqu'ils accomplissent une tâche jointe. Cela nous mènera notamment à discuter des moyens de communications mis à la disposition des robot collaboratifs pour soutenir les prises de décision et les choix d'actions de leurs partenaires humains. Par la suite, nous présenterons en quoi consiste la conscience de la situation et son apport à la prise de décision des opérateurs en milieu industriel. Nous poursuivrons ce chapitre en abordant les travaux de la littérature ayant lié conscience de la situation et interaction humain-robot. Pour finir, nous présenterons un modèle de prise en compte de la conscience de la situation d'un individu par un robot dans la collaboration humain-robot. Ce chapitre nous permet de répondre à la question suivante :

Question 1

Comment modéliser la conscience de situation d'un humain afin qu'elle puisse être soutenue par les actions d'un robot dans le cadre de la collaboration humain-robot ?

Dans le chapitre 2, nous présenterons une analyse de rapports d'accidents de robotique industrielle. Celle-ci a pour but de mettre en évidence les problèmes relatifs à la conscience de la situation des opérateurs en interaction avec des robots dans les milieux industriels. Ce chapitre nous permet de répondre à la question suivante :

Question 2

Quels sont les facteurs de risques qui peuvent participer à la dégradation de la conscience de situation d'un opérateur en milieu industriel ?

Cette analyse mettra en évidence que les accidents de robotique industrielles sont principalement causés par des facteurs appelés démons de la CS (Endsley, 2016). Trois schémas systématiques d'accidents comprenant l'apparition de démons de la CS seront présentés dans ce chapitre.

A partir de cette analyse, nous avons fait l'hypothèse que la principale raison du manque de CS des opérateurs est une mauvaise utilisation des moyens de communication dans l'environnement de travail. Cela nous a amené à considérer l'utilisation du robot en tant que canal de communication à l'aide de ses mouvements dans le chapitre 3. Dans ce chapitre, nous introduirons le concept de mouvement de signalisation en tant que moyen de communication non-verbale du robot. Ils sont considérés comme un moyen de soutenir les interactions d'un robot collaboratif avec un humain. Le point fort de ce type de mouvement réside dans le fait qu'ils permettent au robot de réaliser des tâches tout en communiquant grâce à la redondance de leurs articulations. Nous définirons deux types de mouvements de signalisation : les mouvements de signalisation d'état qui informent l'opérateur de l'état courant du robot et les mouvements de signalisation d'action qui communiquent à propos de la tâche en cours du robot. Nous présenterons un protocole expérimental mettant en oeuvre ces deux types de mouvements et qui nous a permis de répondre à la question suivante :

Question 3

La communication d'un robot à l'aide de ses mouvements permet-elle d'améliorer la conscience de situation d'un humain avec qui il interagit ?

Les résultats expérimentaux montreront que les mouvements de signalisation contribuent effectivement à améliorer la conscience de la situation (CS) des individus en soutenant leurs capacités de projection (niveau 3 de la CS). De plus, ils semblent être un moyen efficace de contrer l'apparition de deux des trois schémas d'accidents mis en évidence dans le chapitre 2. Cependant nos résultats semblent influencés par l'attention des personnes envers le robot.

Par la suite, dans le chapitre 4, nous ré-emploierons l'utilisation des mouvements de signalisation d'une part pour vérifier leur effet réel sur la projection mais aussi pour étudier leur effet sur l'attention des participants dans le cas où celle-ci n'est pas initialement dirigée vers le robot. Ce travail nous permettra également de vérifier si les mouvements de signalisation permettent de contrer l'apparition du troisième schéma d'accident mis en évidence dans le chapitre 2. Nous présenterons un protocole expérimental qui nous a permis de répondre à la question suivante :

Question 4

Les mouvements de signalisation d'un robot permettent-ils d'extraire un humain d'un état de tunnélisation attentionnelle et d'atténuer son manque de capacité de projection dans un scénario de coopération humain-robot ?

Ce chapitre montrera l'importance de la prise en compte des capacités de projection des individus en coopération avec un robot collaboratif. Nous verrons également que la communication non-verbale d'un robot peut être un moyen d'empêcher un humain de se plonger dans un état de tunnélisation attentionnelle.

Dans le chapitre 5, nous discuterons des facteurs qui ont eu une influence sur la saillance des mouvements de signalisation dans nos expérimentations. A l'aide des différences conceptuelles entre nos deux expérimentations et de la littérature, nous tenterons d'apporter une réponse à la question suivante :

Question 5

Quels sont les facteurs qui contribuent à rendre les mouvements de signalisation saillants et porteur de la signification prescrite ?

Pour finir, nous reviendrons sur les contributions de ce travail et les perspectives futures que nous proposons en Conclusion et perspectives de ce manuscrit.

Contributions et liste des publications

Ce travail de thèse a fait l'objet de deux publications dans des journaux (Cambor et al., 2022b, 2024). La première publication montre que la CS est une grille d'analyse qui permet d'analyser des accidents de robotique industrielle (Cambor et al., 2022b). Les contributions de ce travail sont reprises dans le chapitre 2. La deuxième publication montre l'intérêt de prendre en compte la capacité de l'humain à se projeter au cours d'une tâche de collaboration humain-robot (Cambor et al., 2024). Ce travail nous a permis de répondre à la question 4 du chapitre 4.

- **Cambor, B.**, Daney, D., Joseph, L. et al. Attention Sharing Handling Through Projection Capability Within Human–Robot Collaboration. *Int J of Soc Robotics* (2024). <https://doi.org/10.1007/s12369-024-01101-9>

Abstract : Le lien entre la conscience de la situation (CS) et la répartition de l'attention humaine a été étudié dans le cadre de la collaboration homme-robot. Selon (Endsley, 1995), la CS se divise en trois niveaux : la perception, la compréhension et la projection. Elle intervient dans le processus de prise de décision et d'exécution d'actions dans un environnement dynamique. Ce travail étudie trois hypothèses. Premièrement, la capacité à projeter les actions futures d'un robot améliore les performances dans une tâche collaborative. Deuxièmement, plus les participants sont impliqués dans des tâches dans un environnement collaboratif, meilleure sera leur CS. Enfin, l'utilisation de mouvements de communication non-verbale d'un robot attire l'attention d'un participant plus rapidement que si le robot reste immobile. Une étude sur les participants a été conçue pour étudier nos trois hypothèses. Les participants ont été invités à effectuer une tâche de collaboration avec un robot. Ils devaient aider le robot à différents moments pendant qu'ils étaient occupés à une tâche distractive qui attirait leur attention (jeu des tours de Hanoi). Ces moments pouvaient être anticipés et pris en compte dans la boucle de décision et d'action humaine ou non. Enfin, le robot peut utiliser ou non des gestes de communication non-verbale pour attirer l'attention de l'homme. Les résultats ont démontré l'importance de prendre

en compte la capacité de l'homme à projeter les prochaines actions d'un robot dans sa propre gestion de l'attention. En outre, les mesures subjectives n'ont montré aucune différence dans l'évaluation de la CS, contrairement aux mesures objectives, ce qui est conforme à notre deuxième hypothèse. Enfin, il semble que le fait de rester immobile puisse être considéré comme un geste de communication non-verbale. Dans le présent travail, l'attente du robot a permis de mieux capter l'attention humaine lorsque le robot restait immobile plutôt que d'effectuer un mouvement de signalisation.

Lien : <https://link.springer.com/article/10.1007/s12369-024-01101-9>

- **Cambor, B.**, Salotti, J. M., Fage, C., & Daney, D. (2022). Degraded situation awareness in a robotic workspace : accident report analysis. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 23(1), 60-79.

Abstract : Nous avons adopté une approche basée sur les interactions dans un espace de travail robotisé, couplée au modèle de la conscience de la situation (CS) d'Endsley, pour identifier les facteurs qui dégradent potentiellement la CS des opérateurs : les huit démons de la CS. Nous proposons ici d'étudier les implications de ces démons dans 45 accidents industriels impliquant des robots. Ces démons ont été associés aux interactions possibles qu'un humain peut avoir dans un espace de travail robotisé. Nos résultats montrent que cinq des huit démons de la CS apparaissent dans les rapports d'accidents examinés. Les résultats ont montré que les démons de la CS identifiés étaient principalement associés au premier niveau de la CS (niveau de perception). Nous avons également pu décrire cinq modèles d'apparition des démons de la CS dans ces accidents. Les démons de la CS sont généralement impliqués dans les interactions humain-robot plutôt que dans les interactions humain-environnement. Grâce à cette analyse, nous avons découvert que la CS d'un opérateur est principalement affectée par les démons modèle mental errant et hors de la boucle dans les interactions humain-robot et humain-environnement. Enfin, nous proposons des recommandations concernant l'aménagement de l'espace de travail.

Lien : <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1463922X.2021.1879308>

Ce travail de thèse a aussi été valorisé dans une conférence. Dans ce travail, il a été mis en évidence qu'il est possible d'améliorer la CS d'une personne en dotant le robot de gestes de communication non-verbale (Cambor et al., 2022a). La contribution de ce travail a permis de répondre à la question 3 du chapitre 3.

- **Cambor, B.**, Benhabib, N., Daney, D., Padois, V., & Salotti, J. M. (2022, March). Task-consistent signaling motions for improved understanding in human-robot interaction and workspace sharing. In *2022 17th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)* (pp. 275-283). IEEE.

Abstract : Cet article présente le concept des mouvements de signalisation d'un robot interagissant avec un être humain. Ces mouvements consistent à utiliser les degrés de liberté redondants d'un robot effectuant une tâche comme nouveaux moyens de communication significative entre le robot et l'homme. Ils sont générés par un contrôle quasi-statique du couple, en cohérence avec la tâche principale du robot. Une double étude intra-sujet (N=16) est menée pour évaluer les effets de deux mouvements de signalisation sur l'exécution d'une tâche par les participants et sur leur comportement envers le robot. Nos résultats montrent un effet positif à la fois sur

l'exécution de la tâche et sur le comportement des participants. De plus, les deux mouvements de signalisation semblent améliorer la CS des participants en alimentant leur modèle mental tout au long de l'interaction.

Lien : https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9889575?casa_token=W0FTycNoZ9oAAAAA:cIz_atlDEwMCchZEK9w-i6pig57e_XyU-K-JlTCx4JoBwbIy-zqli6WRUafJRhy1ju7REXwL

Ces travaux de recherches ont aussi fait l'objet d'un poster et de deux présentations orales.

— **Cambor, B.**, Benhabib, N., Daney, D., Padois, V., & Salotti, J. M. (2022, November). Signaling Motions for communication in human-robot interaction. In JJCR 2022- Journées des Jeunes Chercheurs et Jeunes Chercheuses en Robotique.

Lien : <https://hal.science/hal-03871485>

— **Cambor, B.**, Salotti, J. M. & Daney, D. (2023). Using cobot motions as a mean of communication with a human. Journée GT3/GT6 du mardi 07 Juin 2022 du GDR Robotique.

— **Cambor, B.**, Daney, D., Joseph, L., & Salotti, J. M. (2023). Gestion de l'attention par la capacité de projection en collaboration humain-robot. Workshop Variabilité et Adaptabilité dans la Collaboration entre Humains et Cobots du jeudi 30 novembre 2023.

Chapitre 1

Modélisation de la conscience de situation en collaboration humain-robot

Table des matières

Introduction	10
1.1 De la robotique industrielle à la robotique collaborative	10
1.1.1 La robotique industrielle	10
1.1.2 Les robots collaboratifs	12
1.1.3 Interaction et Collaboration Humain-Robot	14
1.1.4 L'Interaction Cognitive Humain-Robot	16
1.1.5 Conclusion intermédiaire	17
1.2 Action Jointe et robotique collaborative	18
1.2.1 La théorie de l'action jointe	18
1.2.2 Action jointe et interaction humain-robot	20
1.2.3 Les moyens de communication de l'intention du robot à l'humain	22
1.2.3.1 Le canal auditif	23
1.2.3.2 Le canal tactile	23
1.2.3.3 Le canal visuel	23
1.2.4 Conclusion intermédiaire	24
1.3 La conscience de situation	24
1.3.1 Définitions	24
1.3.2 Les mécanismes cognitifs impliqués dans la conscience de situation	27
1.3.3 Les démons de la conscience de situation	28
1.3.4 Méthode de mesures de la conscience de situation	28
1.3.4.1 Questionnaires de mesures de la conscience de situation	29
1.3.4.2 Mesures comportementales et physiologiques de la conscience de situation	30
1.3.5 Conscience de situation d'équipe	30
1.3.6 Conclusion intermédiaire	32
1.4 Prise en compte de la conscience de situation dans l'interaction et la collaboration Humain-Robot	33
1.4.1 Conscience de situation et Interaction Humain-Robot	33
1.4.2 Proposition d'un modèle de prise en compte de la conscience de situation par un robot	35

Introduction

Cette thèse, « Exploitation du mouvement du robot pour améliorer la conscience de situation dans la collaboration humain-robot », s'articule autour de multiples notions liées aux sciences cognitives, au facteur humain, à l'interaction humain-robot (IHR) et plus précisément à la collaboration humain-robot (CHR).

Ce chapitre a pour but de présenter et relier les concepts généraux abordés dans la suite de ce manuscrit. Nous présenterons ainsi les différentes thématiques nécessaires à la prise en compte de la conscience de la situation (CS) dans le cadre de la collaboration humain-robot (CHR). Enfin, il permettra d'introduire la base du modèle que nous souhaitons proposer et valider à l'aide de nos travaux de recherche.

Ce chapitre répond à la question 1 présentée en Introduction de ce manuscrit.

Question 1

Comment modéliser la conscience de situation d'un humain afin qu'elle puisse être soutenue par les actions d'un robot dans le cadre de la collaboration humain-robot ?

Nous commencerons par présenter ce qu'est la robotique collaborative dans la section 1.1. Ensuite, nous développerons la notion d'action jointe d'abord dans le cadre de la collaboration entre deux humains puis entre un humain et un robot en section 1.2. En section 1.3, nous présenterons la notion de conscience de la situation. Nous nous concentrerons notamment sur le modèle de Endsley (1995b) qui a guidé ce travail de thèse. Nous poursuivrons ce chapitre en présentant les travaux liant la CS et la CHR dans la section 1.4. Nous terminerons cette section par la proposition d'un modèle de prise en compte de la CS par un robot collaboratif dans le cadre d'une action jointe.

1.1 De la robotique industrielle à la robotique collaborative

1.1.1 La robotique industrielle

Un robot industriel (voir figure 1.1) est un manipulateur polyvalent, reprogrammable et contrôlé automatiquement (Dhillon, 1991). Il peut être programmable sur trois axes ou plus et peut être fixe ou mobile (ISO-10218-1, 2012). Ces robots sont généralement isolés dans des cages afin de prévenir de tout danger potentiel pour les opérateurs industriels.

La robotique industrielle est encadrée par deux normes de sécurité (ISO-10218-1, 2012; ISO-10218-2, 2011). La première, « Robots et dispositifs robotiques — Exigences de sécurité pour les robots industriels — Partie 1 : Robots » (ISO-10218-1, 2012) spécifie les exigences et les recommandations pour la prévention, les mesures de protection et les informations pour l'utilisation des robots industriels. Elle décrit les phénomènes dangereux de base associés aux robots, comme les chocs ou les écrasements, et fournit des exigences pour éliminer ou réduire de manière appropriée les risques associés. La deuxième, « Robots et dispositifs robotiques —



FIGURE 1.1 – Photo d’un robot industriel tiré de l’article *S’automatiser, oui, mais pas tout seul*, publié par Olivier James dans le journal L’Usine Nouvelle le 23 novembre 2017.

Exigences de sécurité pour les robots industriels — Partie 2 : Systèmes robots et intégration » (ISO-10218-2, 2011) spécifie les exigences de sécurité pour l’intégration des robots industriels et des systèmes robotisés tels que définis dans la norme ISO-10218-1 (2012).

Les normes de sécurité visent à empêcher l’accès humain à l’espace de travail du robot ou à arrêter le robot lorsqu’un événement inattendu dans l’espace de travail est détecté par des capteurs externes (Meziane et al., 2014). Néanmoins, des accidents se produisent la plupart du temps lorsqu’une personne doit effectuer une tâche à côté d’un robot (Malm et al., 2010). Même si les interactions ne sont pas souhaitées, les opérateurs doivent effectuer des opérations de maintenance, de nettoyage, de dépannage, de réparation ou d’apprentissage du robot ou de l’outil industriel proche. Ils peuvent également travailler à proximité d’un robot opérationnel ou d’une cellule de travail robotisée. Toutes ces raisons conduisent à des situations dangereuses dans l’espace de travail du robot. L’utilisation des mesures de sécurité actuelles peut s’avérer difficile lorsqu’une personne et un robot se trouvent à proximité. En effet, en ce qui concerne les robots conventionnels, bien qu’il soit interdit de s’approcher de la zone du robot, les opérateurs de tous types passent environ trois heures par jour à travailler près d’eux (Aghazadeh et al., 1993).

Les situations dangereuses sont principalement liées à l’intrusion d’opérateurs humains dans l’espace de travail d’un robot, que ce soit pendant les phases opérationnelles ou non opérationnelles, souvent en violation de la procédure de sécurité (Sugimoto & Kawaguchi, 1983). Ainsi, l’interaction physique étroite entre les êtres humains et les robots peut entraîner un risque élevé d’accident (Karwowski & Rahimi, 1991). Les mouvements non naturels et inattendus peuvent être à l’origine de 73% des blessures et des décès liés aux robots (Sugimoto & Ka-

waguchi, 1983). Cela a malheureusement été le cas récemment pour un opérateur sud-coréen¹ qui a été tué par un robot industriel pendant qu'il effectuait une opération de maintenance à proximité de celui-ci.

Jusqu'à présent l'interaction entre les humains et les robots industriels n'était pas souhaitée. En effet, l'envergure des robots industriels et leur dangerosité faisaient que ces robots étaient enfermés dans des cages constituées de barrières physiques et de capteurs de sécurité, réduisant à de manière significative le nombre d'interaction. Comme nous l'avons vu, l'isolement de ces robots n'a pas pour autant empêché des accidents de se produire.

Pourtant, cela est amené à changer avec des initiatives telles que l'*usine du futur* (ou *industrie 4.0*) dont un des enjeux important est de préserver la santé et le confort des opérateurs tout en améliorant leur productivité. Ce changement vers l'usine du futur est accompagné de l'arrivée de nouveaux types de robots dans les industries depuis ces dernières années. Ces nouvelles solutions robotisées ont pour but de contraster avec les applications traditionnelles des robots industriels, dans lesquelles ces derniers sont isolés de tout contact humain. Cette nouvelle vision a pour objectif la collaboration humain-robot (CHR).

1.1.2 Les robots collaboratifs

Le terme « robot collaboratif », ou *cobot* (mot-valise issu de coopération et robot), est introduit pour la première fois par Colgate et al. (1996). Initialement, ils sont décrits comme des dispositifs robotiques manipulant des objets en collaboration avec des opérateurs humains. Plus précisément, les cobots interagissent avec les personnes en générant des surfaces virtuelles définies par logiciel qui contraignent et guident le mouvement de la charge utile partagée (Peshkin & Colgate, 1999). Ces surfaces virtuelles permettent à l'humain et au robot de partager leur espace de travail.

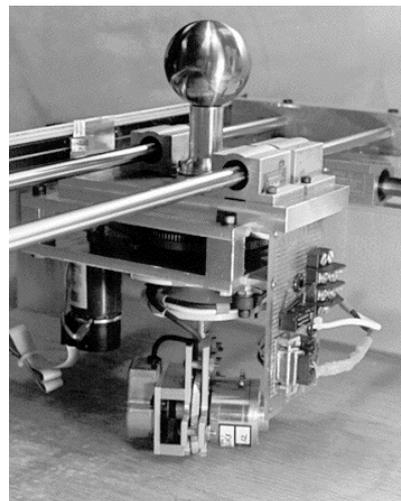


FIGURE 1.2 – Photographie du premier prototype de cobot proposé par Colgate et al. (1996)

Une qualité de la robotique collaborative réside dans la possibilité de combiner les avantages de l'automatisation avec la flexibilité et les compétences cognitives et sociales et techniques des travailleurs humains (Colgate et al., 1996). Contrairement aux robots industriels traditionnels, les robots collaboratifs sont flexibles dans leur utilisation : ils peuvent facilement

1. <https://www.leparisien.fr/faits-divers/un-employe-sud-coreen-tue-par-le-robot-dont-il-assurait-la-maintenance-08-11-2023-6M5WI4IRYRAMPNI6U6A73VJ6UI.php>

changer d'environnement de travail, changer fréquemment de tâche et être programmé facilement par des opérateurs non roboticiens grâce à des interfaces simplifiées (Villani et al., 2018). De son côté, l'humain est capable de s'adapter à des événements imprévus et de conserver ses capacités décisionnelles dans des environnements dynamique et complexe.

La volonté de diminuer les risques auxquels les opérateurs pourraient être exposés dans les environnements coopératifs a mené au développement de la spécification technique « Robots et dispositifs robotiques - Robots coopératifs » (ISO-15066, 2016). Cette spécification technique spécifie les exigences de sécurité pour les systèmes de robots industriels collaboratifs et l'environnement de travail, et complète les exigences et les lignes directrices relatives au fonctionnement des robots industriels collaboratifs figurant dans les normes ISO-10218-1 (2012) et ISO-10218-2 (2011).

Au fil des années, la conception des cobots s'est éloignée de la représentation initiale proposée par Colgate et al. (1996). A l'instar des robots industriels conventionnels, certains ressemblent à des bras articulés, en général bien moins massifs et plus léger que leurs homologues. De plus, ils sont équipés de systèmes de détection dédiés, tels que des capteurs de forces et de couples dans leurs articulations, des systèmes de mesure des forces de réaction transmises au sol ou des capteurs tactiles sur l'ensemble de leur bras. Les paramètres de mouvements, de ces robots sont contrôlés avec une grande précision et il est possible de modifier leurs valeurs pour satisfaire les exigences de sécurité. Physiquement, leur aspect est généralement rond et lisse sans arêtes coupantes ou de surfaces irrégulières, essentielles pour la sécurité et pour éviter les situations dangereuses ou de pincement.



FIGURE 1.3 – Photographie d'un robot collaboratif Panda fabriqué par l'entreprise Franka Emika.

Généralement, il est considéré que les robots collaboratifs appartiennent à un ensemble plus général appelé *système robotique* (voir figure 1.4). Ici, il ne s'agit pas seulement du robot en tant qu'objet mais aussi de son système de perception, de traitement de l'information, de génération de trajectoire et de l'environnement dans lequel il évolue pour réaliser ses actions.

Chaque action du robot est le résultat de son processus de traitement de l'information. D'abord, à l'aide de capteurs internes et externes, il perçoit son environnement. Ces informations perçues alimentent la machine à état du système. Elle est composée d'un ensemble d'états et de fonctions de transitions permettant de passer d'un état à un autre selon des conditions

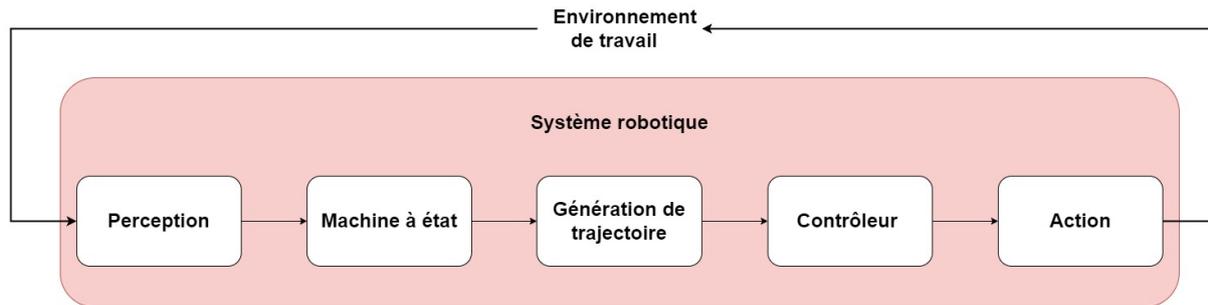


FIGURE 1.4 – Exemple de modèle de système robotique. Le système robotique perçoit d’abord son environnement à l’aide de capteurs. Ensuite, à l’aide des informations perçues et des règles prédéterminées dans sa machine à état, il génère une trajectoire. Cette trajectoire est transmise au contrôleur du robot pour mettre ses moteurs en mouvements et réaliser l’action.

prédéfinies. En d’autres mots, c’est grâce à la machine à état que le système robotique va artificiellement connaître l’ensemble des actions que le robot peut réaliser ainsi que leurs effets sur la tâche. Elle comporte également les conditions nécessaires à la réalisation de chaque tâche en particulier. A l’aide des éléments perçus et de l’état actuel dans la machine à état, le système robotique va déterminer quelle action réaliser pour passer à l’état suivant. Cette action nécessite que le robot génère une trajectoire de mouvement. Une fois la trajectoire générée, le contrôleur envoie la commande d’action au robot. Pour finir, le robot se met en mouvement pour exécuter l’action. Une fois l’action effectuée, l’état du monde (l’environnement de travail) change et est mis à jour à l’aide des capteurs du système robotique.

L’environnement de travail peut-être considéré très généralement, par exemple une pièce dans le monde physique, mais aussi plus précisément, à savoir tous les points de l’espace qu’il peut atteindre quelle que soit sa position ou sa configuration articulaire. Dans ce cas là, on aura tendance à parler d’espace de travail du robot.

1.1.3 Interaction et Collaboration Humain-Robot

Comme nous l’avons défini dans le chapitre , l’interaction humain-robot (IHR) est, d’après Goodrich et al. (2008), le domaine d’étude consacré à la compréhension, à la conception et à l’évaluation de systèmes robotiques destinés à être utilisés par ou avec des êtres humains. La littérature distingue deux grandes catégories d’interaction entre un humain et un robot (Goodrich et al., 2008). D’abord, *l’interaction de proximité*, caractérisée par le fait que l’humain et le robot se trouvent dans un même espace de travail. La deuxième catégorie est *l’interaction à distance*, dans laquelle l’humain et le robot sont séparés dans l’espace ou même dans le temps. Les auteurs poursuivent en déclinant l’interaction de proximité en deux sous-ensembles : l’interaction *sociale* et l’interaction *physique* (pHRI) (Haddadin & Croft, 2016). L’interaction sociale comprend les aspects sociaux, émotionnels et cognitifs de l’interaction. Dans l’interaction sociale, les humains et les robots interagissent en tant que pairs ou compagnons. La pHRI ne nécessite pas d’avoir un contact physique ou matériel avec un ou plusieurs humains. Dans ce cas là, la boucle d’interaction peut être géométrique, cinématique, statique ou dynamique. Par exemple, prendre en compte la position de l’opérateur dans l’espace de travail est considéré comme de la considération de l’interaction physique.

Traditionnellement, le terme collaboration humain-robot (CHR) fait référence à l’utilisation de robots sans clôture de sécurité, autrement dit, hors de leur cage (Bauer et al., 2016). Ainsi,

la séparation des espaces de travail de chacun se voit éliminée au profit d'un partage de l'environnement de travail. Nous considérons le concept d'espace de travail cobotisé (voir figure 1.5) comme l'*espace* dans lequel un *humain* et un *robot* interagissent pour effectuer une *tâche* (Salotti et al., 2018).

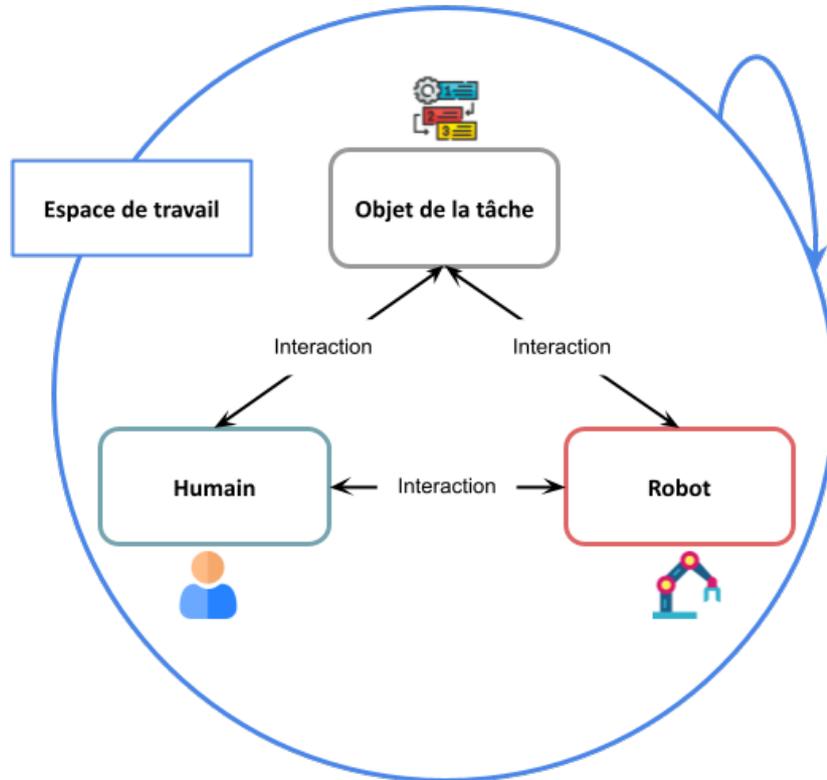


FIGURE 1.5 – Modèle d'espace de travail cobotisé inspiré de Salotti et al. (2018).

L'intersection potentielle entre la zone du robot et celle de l'humain est communément appelée « espace de travail partagé ». Le partage d'espace de travail a donné lieu à différents modes d'interaction (Bauer et al., 2016; Müller et al., 2017; Matheson et al., 2019; Kumar et al., 2020) :

- **La coexistence** : l'humain et le robot partagent le même environnement mais ne partagent pas leur espace de travail respectif. Généralement, il n'y a pas de contact direct entre l'humain et le robot. L'objet du travail peut être échangé entre eux, mais le processus est exécuté de manière indépendante et simultanée.
- **La coopération séquentielle** : l'humain et le robot partagent l'espace de travail à des moments différents. La conception du flux de travail doit être faite de sorte qu'un seul des agents est présent dans l'espace de travail à la fois. L'un des deux partenaires guide ou contrôle l'autre grâce aux différentes modalités de communication possibles.
- **La coopération** : l'humain et le robot partagent le même espace de travail, au même moment et sur des tâches séparées. Ici, les deux partenaires ne travaillent pas simultanément sur le même produit ou composant. En revanche, les deux agents peuvent partager temporairement certaines de leurs ressources physiques, cognitives ou informatiques.
- **La collaboration** : l'humain et le robot partagent le même espace de travail, au même moment et travaillent simultanément sur le même produit ou composant. Dans ce cas,

l'action de l'un a une conséquence immédiate sur l'autre grâce à des capteurs et systèmes de vision. On parle d'action jointe des deux partenaires, à savoir accomplir à deux un ensemble de tâches de travail.

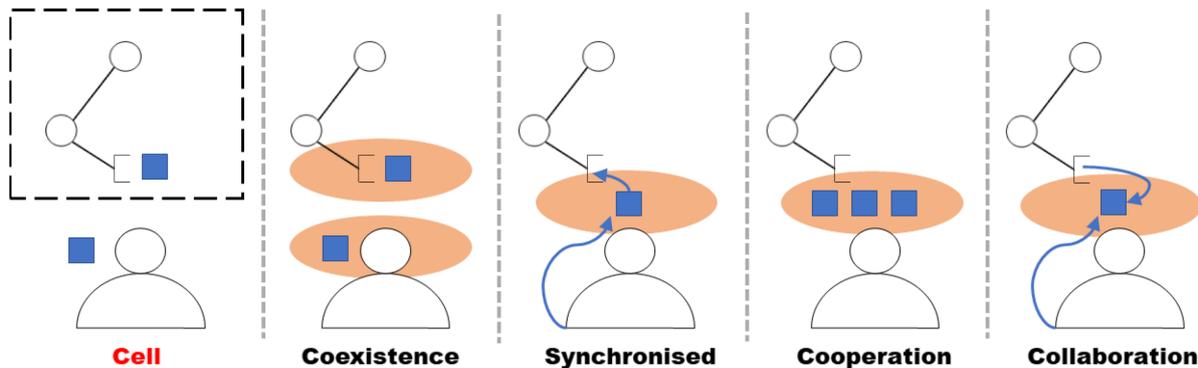


FIGURE 1.6 – Spectre d’interaction entre un humain et un système robotique d’après Matheson et al. (2019). De gauche à droite : « Cell » correspond à une interaction « traditionnelle » dans le cas où le robot est enfermé dans une cage. « Synchronised » correspond à la coopération séquentielle.

Dans une autre revue de la littérature douze scénarios collaboratifs différents entre un humain et un robot ont été proposés (El Zaatari et al., 2019). Pour chaque scénario, les auteurs proposent une description de la tâche de l’humain et du robot et proposent un exemple provenant de la littérature. Les scénarios relevés sont des tâches de co-manipulation, fixation, transfert, assemblage, prise et mise en place, récupération, soudure, éclairage, vérification, perçage, ponçage et de vissage. La plupart de ces tâches correspondent à des modes de coopération séquentielle ou de collaboration. Ces tâches sont rendues possibles par la volonté de prendre en compte l’humain dans l’interaction afin de renforcer la sécurité vis-à-vis des cobots. En effet, un des principaux défis liés à la robotique collaborative relève en priorité de la sécurité (Michalos et al., 2015; Villani et al., 2018; El Zaatari et al., 2019; Kumar et al., 2020). Quatre catégories de modes opératoires collaboratifs sont définis pour les cobots (ISO-15066, 2016) et repris dans (El Zaatari et al., 2019; Hentout et al., 2019; Kumar et al., 2020) : (i) l’arrêt contrôlé de sécurité, (ii) le guidage manuel, (iii) la surveillance de la vitesse et de la séparation et (iv) la limitation de la puissance et de la force.

Le plus souvent, ces modes opératoires sont déjà intégrés dès la conception de la majorité des modèles de cobots conformément aux normes ISO ISO-10218-1 (2012) et ISO-15066 (2016) et contribuent à assurer une sûreté d’interaction minimale aux opérateurs lors de scénarios de CHR. Cependant, ces modes sont peu flexibles et peuvent être sous-optimaux du fait d’arrêts répétés des lignes de production en raison de leur rigidité (Skuric et al., 2021; Alberto et al., 2023). Enfin, ces mesures de sécurité concernent principalement l’interaction au sens physique du terme et tiennent peu compte des variabilités, notamment cognitives.

1.1.4 L’Interaction Cognitive Humain-Robot

La cognitive Human-Robot Interaction (cHRI) est un domaine de recherche qui vise à améliorer les interactions entre les humains et les robots en développant des modèles cognitifs (simulés) pour les robots et en comprenant les modèles mentaux humains des robots (Mutlu et al., 2016). Pour cela, les systèmes robotiques doivent pouvoir disposer de représentations appropriées de l’environnement, de la tâche à accomplir et des capacités, des attentes et des

actions de leurs homologues humains. Aussi, ils doivent être capables d'évaluer les effets de leurs propres actions sur l'environnement, leur tâche et les individus (Mutlu et al., 2016).

Il s'agit de s'inspirer de la manière dont les humains interagissent entre eux, à savoir de s'appuyer sur des modèles mentaux d'eux-mêmes, de leurs partenaires d'interaction, du contexte immédiat de l'interaction et du contexte physique, social et culturel (Mutlu et al., 2016). Ainsi, pour interagir efficacement avec des individus, un robot a besoin de modèles similaires l'aidant à déterminer ses propres actions, leurs effets et à prédire celle des personnes autour de lui.

L'un des principes fondamentaux de la cHRI est de considérer que les humains, les robots et le contexte de leur interaction forment un système cognitif complexe situé dans le monde réel. Les principales activités de ce domaine de recherche consistent à développer des cadres d'applications qui représentent ce système (Mutlu et al., 2016). D'après les auteurs, ces cadres d'applications reposent sur trois champs de recherches :

1. Les modèles humains d'interaction : la compréhension des modèles mentaux qu'ont les personnes des robots, comment ils perçoivent les robots et interprètent leurs actions et comportements, et comment ces perceptions et interprétations évoluent en fonction des contextes et des groupes d'utilisateurs.
2. Les modèles robotiques d'interaction : le développement de modèles qui permettent aux robots de cartographier les aspects de l'interaction dans le monde physique et du point de vue cognitif de l'humain grâce à l'interaction avec l'environnement social et physique.
3. Les modèles d'IHR : la création de modèles et de mécanismes qui guident la communication et la collaboration humain-robot, la planification des actions et l'apprentissage de modèles.

Jusqu'à présent, la cHRI concerne avant tout des applications de robotique sociale ou de service (Kopp et al., 2021). Pour autant, il pourrait s'avérer favorable de s'inspirer de ces travaux dans le cadre de la collaboration humain-robot. Cela reviendrait à s'inspirer de la manière dont des humains réalisent des tâches ensemble et de doter les robots de capacités leur permettant de collaborer de manière similaire (Belhassein et al., 2022).

1.1.5 Conclusion intermédiaire

Nous avons vu qu'il y avait une volonté de ré-introduire les humains dans les environnements industriels grâce à l'introduction de robots collaboratifs dans ces milieux. Néanmoins, cette transition des robots en dehors de leur cage doit être faite en imposant que la sécurité des opérateurs soit assurée. Il ne s'agit pas seulement de sécuriser les interactions physiques. En effet, les humains sont des êtres sujets à de nombreuses variabilités, notamment cognitives, intra et inter-personnelles. Les robots doivent donc être capables de soutenir les humains d'un point de vue cognitif. Une des pistes explorée par la recherche en cHRI consiste à s'inspirer des interactions que les humains ont entre eux et de doter, dans la mesure du possible, les robots de capacités semblables (Belhassein et al., 2022).

1.2 Action Jointe et robotique collaborative

1.2.1 La théorie de l'action jointe

En philosophie, la théorie de l'action jointe (ou action conjointe) ou d'activité coopérative partagée, désigne un type particulier d'interaction interpersonnelle (Bratman, 1992). Un exemple commun concerne celui de deux personnes portant un meuble pendant un déménagement (voir figure 1.7). Dans cet exemple, deux individus réalisent une action jointe (porter un meuble) en poursuivant un objectif commun (le déplacer d'un point *A* à un point *B*). Pour autant, les deux individus ne réalisent pas forcément les mêmes actions. Certes ils porteront tous les deux le meuble, mais pas de la même manière. Les deux individus ne partagent pas forcément les mêmes perceptions. Ils peuvent être face à face ou bien l'un derrière l'autre. Les participants à l'action jointe peuvent aussi se partager des rôles de meneur et de suiveur de manière interchangeable. Le meneur aura tendance à diriger le meuble dans les directions nécessaires et à donner des indications au suiveur, par exemple si ce dernier est de dos.

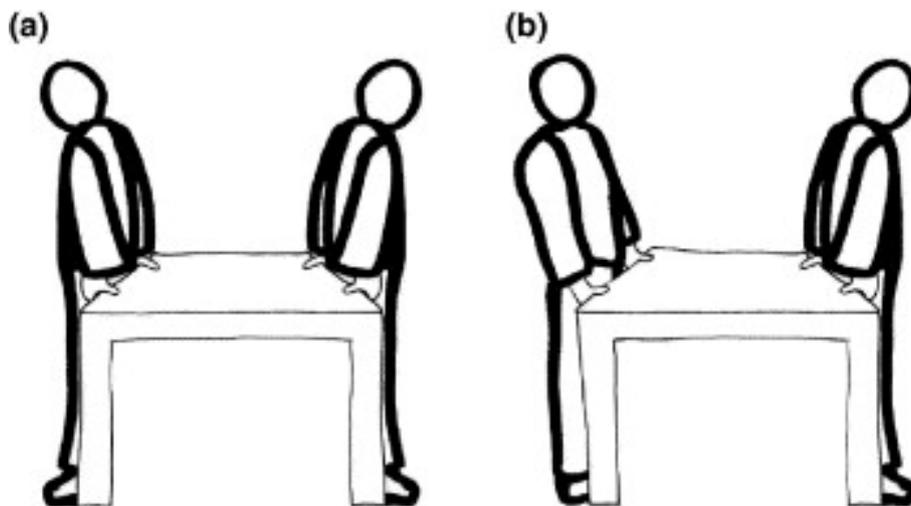


FIGURE 1.7 – Action jointe pour déplacer un meuble. Plutôt que d'imiter les actions de l'autre (a) les personnes doivent parfois effectuer des actions complémentaires (b) pour atteindre un objectif commun. Tiré de Sebanz et al. (2006).

Selon Bratman (1992), il s'agit avant tout de poursuivre un objectif commun et ce quelque soit les intentions et les raisons de réaliser l'action pour chacun des individus. Il décrit trois traits caractéristiques d'activité coopérative partagée : (i) la réceptivité mutuelle, (ii) l'engagement dans l'activité commune et (iii) l'engagement envers le soutien mutuel.

Le terme d'action jointe est fréquemment utilisé de manière interchangeable avec les termes coopération ou collaboration (Becchio et al., 2010). Ces notions impliquent une pluralité d'individus rassemblés sous le nom d'équipe. Une équipe est définie comme un petit nombre de partenaires aux compétences complémentaires qui s'engagent à atteindre un but commun, un objectif de performance et une approche pour lesquels ils se tiennent mutuellement responsables (Katzenbach & Smith, 2015). L'action jointe peut être considérée comme toute forme d'interaction sociale par laquelle deux individus ou plus coordonnent leurs actions dans le temps et dans l'espace afin de provoquer un changement dans l'environnement (Sebanz et al., 2006). Les auteurs proposent que la réussite de l'action jointe dépende des capacités (i) de partager des représentations, (ii) de prédire des actions et (iii) d'intégrer les effets prévus de ses propres actions et de celles des autres :

1. Le partage des représentations est permis grâce à l'attention jointe (Frischen & Tipper, 2004). Cette dernière permet la création d'un *terrain d'entente perceptif* dans l'action jointe. Elle permet l'initiation d'une action coordonnée et la coordination une fois que les individus sont déjà engagés dans une action commune.
2. Prédire les actions des partenaires est un processus en plusieurs étapes. D'abord l'observation de l'action qui peut se traduire comme la connaissance de ce que les autres vont faire. Ce mécanisme s'observe au niveau neuronal grâce aux neurones miroirs (Grèzes et al., 2003). Lors de l'observation d'une action, ces derniers s'activent et construisent une représentation correspondante dans le système d'action de l'observateur (Rizzolatti & Craighero, 2004). La seconde est la répartition des tâches, ou la connaissance de ce que les autres devraient faire. Cette dernière permet à l'individu de former des attentes en lien avec les conditions de stimulation dans lesquelles une personne effectue une action (Sebanz & Frith, 2004).
3. Enfin, la coordination des actions est le processus essentiel pour intégrer les effets prévus de ses propres actions et de celles des partenaires. Ce mécanisme concerne la façon dont les individus ajustent leurs actions à celles d'autres personnes dans le temps et l'espace (Michael et al., 2016).

La réalisation d'une action jointe requiert des deux partenaires de mettre en œuvre des mécanismes de coordination, de perception, de planification, d'exécution et de contrôle avant et pendant leur performance (Sebanz et al., 2006; Knoblich et al., 2011; Vesper et al., 2016). D'autres auteurs considèrent que l'action jointe nécessite le partage des buts et des intentions des individus (Carpenter, 2009; Cohen & Levesque, 1991; Fiebich & Gallagher, 2013; Tomasello et al., 2005). Dans ce cas, la seule coordination des actions des agents opérants n'est plus une condition suffisante à l'action jointe.

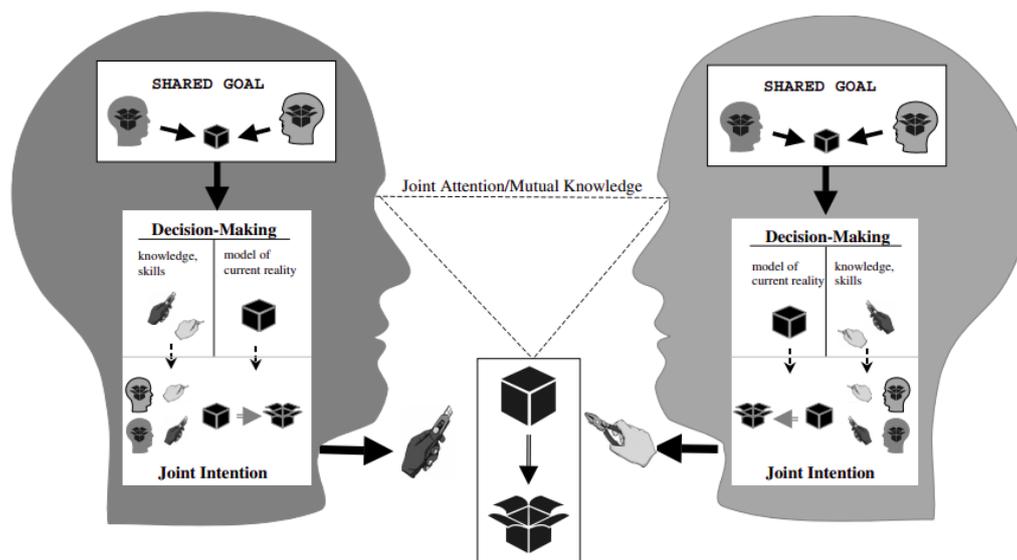


FIGURE 1.8 – Conception d'une activité de collaboration pour chaque partenaire d'après Tomasello et al. (2005). Pour réaliser d'une action jointe, chaque membre de l'équipe partage un objectif, une attention commune et une intention d'action avec ses partenaires. Ils ont chacun une prédiction de l'action que leur partenaire réalisera pour accomplir la tâche partagée. Les membres ont des rôles complémentaires permettant d'atteindre l'objectif commun de la tâche.

Dans le cadre d'une action jointe, il est considéré que les agents coordonnent délibérément

leurs intentions les uns avec les autres, on parle alors de coordination intentionnelle ou planifiée (Curioni et al., 2019). Les actions jointes nécessitent que les partenaires puissent se représenter leurs actions et leurs conséquences ainsi que celles de leur partenaires (Belhassein et al., 2022). Aussi, les partenaires doivent pouvoir se représenter la hiérarchie des sous-buts et des sous-tâches du plan d'action. De plus, ils doivent être capables de générer des prédictions de leurs actions conjointes. Enfin, les partenaires doivent suivre la progression vers le but commun et éventuellement compenser ou aider les autres à réaliser leurs contributions (Pacherie, 2014).

D'un point de vue plus général, la théorie de l'action jointe ne se restreint pas seulement à des équipes composées seulement d'humains. En effet, bien qu'initialement elle concernait des interactions entre plusieurs humains, celle-ci a aussi été étudiée dans le contexte d'interaction entre humain(s) et robot(s) (Glasauer et al., 2010; Mutlu et al., 2016; Clodic et al., 2017).

1.2.2 Action jointe et interaction humain-robot

Comme nous l'avons vu précédemment, une collaboration efficace nécessite des partenaires d'une action jointe de mettre en œuvre des mécanismes de coordination, de perception, de planification, d'exécution et de contrôle avant et pendant la performance (Sebanz et al., 2006; Knoblich et al., 2011; Vesper et al., 2016). Mettre en œuvre ces mécanismes permet aux partenaires humain-robot d'être en accord sur un objectif commun et sur une intention commune d'atteinte de l'objectif. Pour obtenir une intention commune, les partenaires doivent connaître les intentions des autres membres de l'équipe et savoir ce qu'ils font. Or, un robot n'est pas un être conscient, ou du moins il ne peut disposer que d'une conscience artificielle (McCarthy, 1995; Dennett, 1997; Kitamura et al., 2000). Pour participer à une action jointe, dans sa stricte définition, un robot doit être doté de capacités de perception et de compréhension de son environnement, de prise de décision, de planification, d'apprentissage et de réflexion (Bauer et al., 2008). Grâce à ces compétences, le robot est capable de connaître les intentions des autres membres de l'équipe et ainsi de planifier ses propres actions afin de contribuer à l'intention commune et d'atteindre l'objectif commun. Ainsi, permettre à un robot de participer à des actions jointes nécessite en premier lieu de le munir de capacités cognitives semblables à celles d'humains.

Les étapes menant à une action jointe lors de la CHR sont (i) l'intention jointe (ou la communication des intentions), (ii) la planification de l'action et (iii) l'exécution de l'action (Bauer et al., 2008). D'après les auteurs, ces étapes s'effectuent dans un contexte dynamique et sont répétées après chaque exécution d'action (voir figure 1.9). Si l'un des partenaires agit d'une manière qui n'a pas été prévue par les autres pairs, les actions doivent être replanifiées. En conséquence, l'intention doit être ré-estimée en permanence, car les états et les intentions changent au fil du temps.

1. L'intention jointe : dans cette étape, les partenaires doivent s'accorder à accomplir un objectif commun. C'est généralement l'humain qui définit cet objectif. Ce dernier peut communiquer son intention avec le robot de manière délibérée par une communication explicite ou de manière implicite par ses actions. Une fois que l'intention humaine est estimée par le robot, il a pour rôle de l'assister dans la réalisation de cet objectif désormais commun.
2. La planification de l'action : cette étape vient après le partage d'intention. Les partenaires doivent planifier leurs actions en fonction des actions de leur partenaires, on parle ici d'action jointe. Pour planifier une action, un agent (humain ou robotique) a

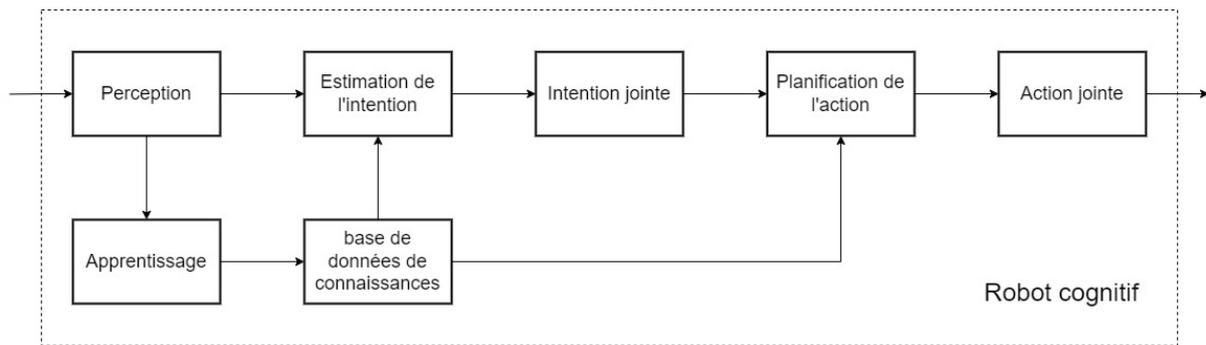


FIGURE 1.9 – Mécanismes d’un robot impliqués pour mener à une action jointe. D’abord, le robot perçoit l’action de l’humain. À partir de cette action et de sa base de données de connaissances (obtenue par apprentissage), le robot estime l’intention de son partenaire. Ensuite, le robot doit planifier sa prochaine action afin d’assister l’humain dans la réalisation de son objectif. Pour finir, le robot exécute l’action correspondante. Reproduit et traduit de Bauer et al. (2008).

besoin d’informations sur les actions et les intentions des autres agents, ainsi que de connaissances sur les capacités de tous les partenaires et sur l’état de l’environnement. Sur la base de ces connaissances, une action appropriée doit être choisie parmi un ensemble d’actions possibles, qui contribue à la réalisation du plan commun sans gêner aucun partenaire dans son propre sous-plan d’actions.

3. L’exécution de l’action : Cette étape est atteinte une fois l’intention correctement partagée et les actions de chacun planifiées. L’exécution peut être faite soit par un partenaire seul, soit conjointement avec d’autres partenaires.

Atteindre ces trois étapes nécessite que le robot soit capable de gérer une représentation de lui-même et une représentation de l’humain avec lequel il interagit. En d’autres termes, le robot doit pouvoir maintenir des modèles mentaux artificiels de lui-même et de l’humain. Il doit également être capable de mettre à jour ces modèles mentaux au fur et à mesure que l’action se déroule et que les représentations des agents évoluent. La mise à jour de ces modèles mentaux demande la prise en compte de la perspective personnelle de chaque agent. En effet, les représentations des agents peuvent évoluer en fonction de leurs points de vue respectifs (Clodic et al., 2017). Cela fait écho à la théorie de l’esprit (Frith & Frith, 2005). En psychologie, la théorie de l’esprit fait référence à « la capacité de comprendre et de prendre en compte l’état mental d’un autre individu » (Premack & Woodruff, 1978). Cela comprend la connaissance du fait que les croyances, les désirs, les intentions, les émotions et les pensées des autres peuvent être différents des nôtres (Baron-Cohen, 1991). Il a été montré dans une expérience que les robots pourvus de cette compétence sociale étaient considérés comme des coéquipiers socialement plus naturels et intelligents (Hiatt et al., 2011). Aussi, cela permettrait de garantir une exécution du plan partagé plus efficace et fluide (Devin & Alami, 2016). Cependant, il est important de garder à l’esprit que la mise en place de telles compétences sociales chez des robots peut être complexe en raison des limites actuelles de l’intelligence artificielle, notamment pour les connaissances abstraites ou implicites (Verma et al., 2024).

Le comportement du partenaire robotique doit être facilement et intuitivement compris dans un contexte d’interaction et ne doit pas nécessiter de formation ni d’adaptation de la part de l’humain (Glasauer et al., 2010). Des travaux antérieurs ont montré que les mouvements d’un robot pouvaient faciliter la coordination jointe avec un humain et aider sa compréhension des objectifs du robot (Dragan et al., 2013, 2015). Les auteurs soutiennent qu’il serait bénéfique de

soutenir la lisibilité plutôt que la fonctionnalité ou la prédictibilité du mouvement. La prédictibilité d'une action est relative à sa similitude avec l'action que l'observateur attendrait pour un objectif donné (action inférée à partir de sa finalité). A l'inverse, une action est lisible quand elle permet à l'observateur d'en prédire l'objectif ou l'intention qu'elle exprime (finalité inférée à partir de l'action). Le concept de mouvements lisibles fait référence au principe de transparence du robot (Chakraborti et al., 2019). Elle est définie comme « l'observabilité, la compréhensibilité et la prévisibilité du comportement d'un robot » (Alonso & De La Puente, 2018). Autrement dit, l'opérateur doit être capable, à tout instant, de répondre aux questions suivantes : que fait le robot ? Pourquoi fait-il cela ? Que fera-t-il ensuite ? La réponse à ces multiples questions peut être apportée via différents canaux de communication auxquels le robot peut avoir accès pour interagir avec l'humain et lui transmettre les informations adéquates.

1.2.3 Les moyens de communication de l'intention du robot à l'humain

La communication est le processus de transmission d'informations d'un agent à un autre (Mortensen, 2017). L'émetteur est la source d'information et code l'information sous une forme, telle qu'un signal, qui est transmise à l'autre agent, le récepteur, par l'intermédiaire d'un canal ou d'une modalité (Shannon, 1948).

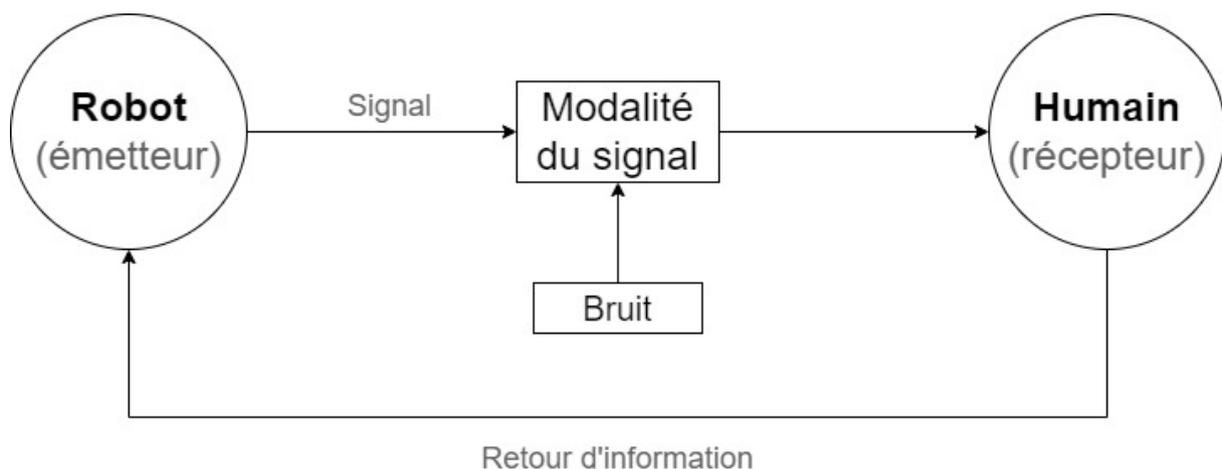


FIGURE 1.10 – Communication du robot à l'humain. Le robot encode et envoie des informations par le biais d'un signal à un récepteur humain qui les décode et répond par un retour d'information. Le canal (c'est-à-dire la modalité du signal) est soumis à des bruits ou à des perturbations environnementales (par exemple, les sons ambiants) qui peuvent interférer avec la capacité du récepteur à décoder le message et à obtenir l'information contenue dans le signal. L'émetteur peut utiliser la réponse ou la réaction du récepteur comme retour d'information sur le message. Reproduit et traduit de Cha et al. (2018).

La communication entre les différents agents, qu'elle soit verbale ou non verbale, est nécessaire pour coordonner le travail d'équipe et faciliter les prédictions des autres individus (Hoffman, 2019; Knepper et al., 2017). Permettre au robot de communiquer rend ses actions plus transparentes et prévisibles. Cela facilite ainsi la prise de décision de l'humain tout en favorisant une interaction plus fluide et réussie (Hoffman, 2019). La fluidité collaborative correspond au fait de coordonner des activités communes entre les membres d'une équipe bien synchronisée (Hoffman, 2019). En outre, la communication permet d'améliorer la motivation à réaliser des tâches, l'engagement et la volonté de répondre aux attentes des partenaires (Belhassein et al., 2022).

Un robot peut communiquer avec un humain en utilisant différents canaux sensoriels, à

savoir, l'ouïe, le toucher et la vue (Bauer et al., 2008; Ajoudani et al., 2018; Bonarini, 2020; Lemasurier et al., 2021). Ces communications peuvent être faites à l'aide de technologies supplémentaires ou du robot seul.

1.2.3.1 Le canal auditif

Le son est une modalité de communication qui peut engager, informer, transmettre une narration, susciter l'attention et l'affection (Bauer et al., 2008; Bonarini, 2020). Il peut être utilisé pour renforcer et compléter un système de communication verbale ou non verbale ou pour transporter un contenu unique sans nécessiter de contact visuel avec les partenaires d'interaction (Bonarini, 2020; Chidambaram et al., 2012; Schwenk & Arras, 2014). Les communications peuvent se faire de plusieurs manières sur ce canal. Par exemple, le robot peut seulement effectuer des sons seuls, à l'image du robot R2-D2 de Star Wars (Breazeal, 2004; Schwenk & Arras, 2014; Jee et al., 2010; Read & Belpaeme, 2014; Fischer et al., 2014; Read & Belpaeme, 2016; Cha & Matarić, 2016) ou, à l'aide d'outils supplémentaires, produire du langage, à l'image de C-3PO si nous poursuivons avec l'exemple de Star Wars (Breazeal, 2004; Cahn, 1989; Taylor, 2009; Fischer et al., 2014). Le bruit des moteurs d'un robot est aussi compris dans ce canal (Cha et al., 2018; Tennent et al., 2017; Bonarini, 2020).

1.2.3.2 Le canal tactile

Les systèmes robotiques peuvent transmettre des informations par la voie haptique par différents moyens de communications (Bauer et al., 2008). La communication par la modalité tactile peut se faire grâce au robot lui-même (Cramer et al., 2009; King et al., 2009; Chen et al., 2011; Arnold & Scheutz, 2018), avec des interfaces haptiques (Okamura, 2009; Bethea et al., 2004; Diolaiti & Melchiorri, 2002; Bowyer et al., 2013) ou bien des vibrations (Silvola & Russell, 2005; Ajoudani et al., 2014; Haynes et al., 2019; Song & Yamada, 2017). La plupart du temps, les communications tactiles sont des solutions réactives aux actions d'un humain (Lamy et al., 2009).

1.2.3.3 Le canal visuel

Il existe différentes manières de communiquer visuellement avec un humain notamment par le biais de lumières (Baraka et al., 2016; Cha et al., 2017; Song & Yamada, 2018; Cha & Matarić, 2016; Cha et al., 2018), d'images et d'écrans (Villani et al., 2018; Eimontaite et al., 2022), à l'aide du regard (Yoshikawa et al., 2006; Admoni et al., 2014), ou des mouvements du robot (Okuno et al., 2009; Chidambaram et al., 2012; Salem et al., 2012; Huang & Mutlu, 2013; Dragan et al., 2013, 2015).

La lumière peut être émise par des LED ou d'autres sources lumineuses qui, en exploitant la couleur, l'intensité et la fréquence de clignotement, peuvent transmettre des états émotionnels ou des messages avec un contenu (Baraka et al., 2016; Cha et al., 2017; Song & Yamada, 2018; Cha et al., 2018). Ce type de signal permettrait notamment d'améliorer l'expression de l'intention de robots (Cha et al., 2017; Song & Yamada, 2018) ou de communiquer à propos de l'état d'un robot aux utilisateurs (Baraka et al., 2016).

L'interaction par l'intermédiaire d'un écran, souvent tactile, permet de transmettre un grand nombre d'informations, qu'elles soient textuelles ou visuelles. Les écrans permettent de transmettre des informations spécifiques sur l'intention d'un robot (Shrestha et al., 2016; Warta et al., 2018), en communiquant à propos de la trajectoire que le robot va emprunter (Matsumaru et al.,

2005; Szafrir et al., 2015) ou en montrant l'objet qu'un robot souhaite saisir (Mutlu et al., 2009). Les images peuvent également être projetées sur le sol (Matsumaru et al., 2005, 2006; Shrestha et al., 2016) ou sur des objets (Andersen et al., 2016). Une dernière possibilité pour les écrans est de les utiliser pour montrer soit un visage animé, soit des parties de celui-ci parfois intégrées dans des visages physiques (Breazeal et al., 2005).

Le regard peut être utilisé comme moyen de communication non-verbale indicateur de l'intention d'un partenaire humain (Yoshikawa et al., 2006; Mutlu et al., 2009; Saulnier et al., 2011; Admoni et al., 2014; Cuijpers & Knops, 2015; May et al., 2015; Khambhaita et al., 2016; Admoni et al., 2016; Mikawa et al., 2018; Aliasghari et al., 2021). Il s'agit d'un élément clé de l'attention conjointe, c'est-à-dire de l'attention partagée sur un objet commun, qui permet la coordination physique (Admoni et al., 2011).

Une autre façon d'exploiter le canal visuel de l'humain pour le robot est de bouger son corps ou des parties de celui-ci (Gielniak & Thomaz, 2011). Les gestes sont une forme populaire de communication non-verbale qui comprend des mouvements visibles des mains, des bras, du visage et d'autres parties du corps pour exprimer une idée ou une signification (Knapp et al., 2013; Lemasurier et al., 2021). L'idée ici est de s'inspirer de l'humain, connu pour transmettre la majeure partie du contenu de la communication grâce à son langage corporel (Watzlawick et al., 2011). Doter les robots de langage corporel contribuerait à améliorer le caractère naturel et transparent de l'interaction (Bonarini, 2020). En effet l'humain est capable de distinguer de nombreuses informations en observant des mouvements d'autres humains, que ce soient des caractéristiques physiques ou cognitives (Colombel, 2022). De ce fait, de nombreux travaux sur les mouvements des robots cherchent à reproduire et imiter autant que possible les mouvements des humains (Huang & Mutlu, 2013; Salem et al., 2012; Ishiguro & Dalla Libera, 2018). Ceci dans les limites du possibles en lien avec l'implémentation mécanique des articulations, généralement différente des articulations biologiques, en particulier avec les robots collaboratifs.

1.2.4 Conclusion intermédiaire

Nous avons vu que IIHR pouvait être améliorée en s'inspirant des interactions que les humains ont entre eux et de doter, dans la mesure du possible, les robots de capacités qui contribuent à favoriser la qualité de l'interaction. En s'inspirant des théories de l'action jointe et de la transparence, le robot pourrait soutenir, grâce à ses moyens de communication, les capacités de prises de décisions d'un humain dans un contexte de CHR. Soutenir les décisions et les choix d'action d'un humain peut se faire en soutenant sa conscience de la situation (CS) (Chen et al., 2014).

1.3 La conscience de situation

1.3.1 Définitions

La conscience de la situation, ou *Situation Awareness (SA)* en anglais, correspond, dans sa définition la plus simple, à « *la connaissance de ce qu'il se passe autour de soi* » (Endsley, 1995b). Dans la littérature scientifique, elle est communément présentée comme étant « *la perception des éléments de l'environnement dans un volume de temps et d'espace, la compréhension de leur signification, et la projection de leur statut dans un futur proche* » (Endsley, 1995b). Elle est un élément essentiel du processus de prise de décision et de réalisation d'actions. Plus généralement elle peut être vue comme la capacité d'un individu à orienter ses prises

de décisions en fonction de ses buts prédéfinis et de ses modèles mentaux construits à partir des informations perçues dans l'environnement. La CS est un élément crucial de la prise de décision dans des systèmes complexes tel que l'aviation, le contrôle aérien, les opérations militaires, les interventions médicales, la navigation gestion de systèmes à grande échelle (usine, raffinerie ou nucléaire) (Endsley, 2016). Elle est aussi un mécanisme invoquée dans des situations plus courantes comme la conduite ou le sport. Plus couramment, la CS est mise en œuvre lorsqu'une activité nécessite une mise à jour dynamique de la situation par un individu.

Conformément à la définition proposée par Endsley (1995b), la CS est constituée de trois niveaux (voir figure 1.11).

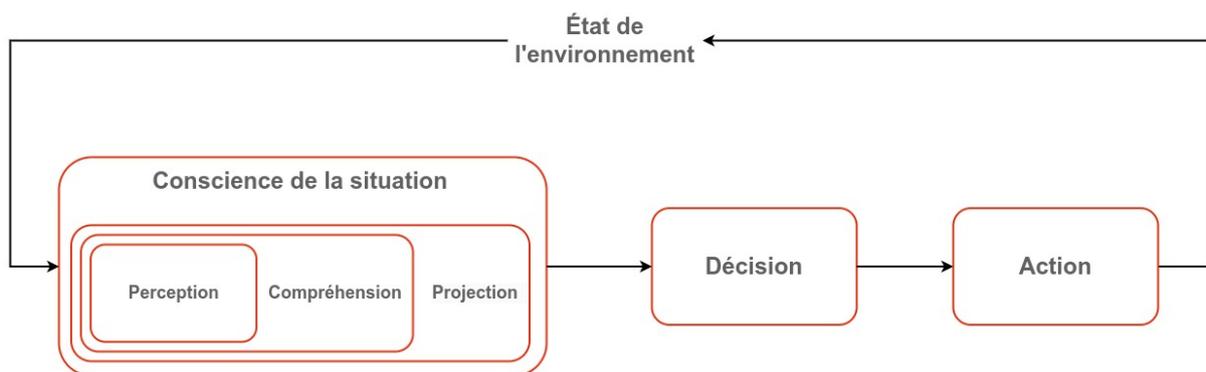


FIGURE 1.11 – Modèle simplifié de la CS à 3 niveaux de Endsley (1995b).

La première étape nécessaire à la construction d'une bonne CS est la **perception** (Niveau 1 de la CS) du statut, des attributs et de la dynamique des éléments pertinents de l'environnement. La perception peut se faire à l'aide d'une ou plusieurs des modalités sensorielles : visuelles, auditives, tactiles, gustatives ou olfactives. Les communications verbales et non verbales constituent une source d'information supplémentaire qui contribue au niveau 1 de la CS. L'expérience de l'individu a une influence sur les éléments perçus et jugés significatifs. Chacune de ces sources d'information est associée à différents niveaux de fiabilité. Enfin, la confiance dans l'information, basée sur le capteur, l'organisation ou l'individu qui la fournit, ainsi que dans l'information elle-même, constituent une partie essentielle du niveau 1 de la CS.

La seconde étape correspond à la **compréhension** (Niveau 2 de la CS) des données et de la signification des indices pertinents perçus par rapport aux buts et objectifs prédéfinis. Elle repose sur une synthèse des éléments désordonnés du niveau 1 et sur une comparaison de ces informations avec les objectifs de l'individu. Sur la base de sa connaissance des éléments perçus, la personne se construit une image holistique de l'environnement et peut relier les mouvements des robots à son objectif. Comprendre l'importance de données perçues permet d'associer une signification et un sens spécifique lié aux objectifs et à l'information dont l'individu dispose. Le développement de la compréhension à partir des données perçues nécessite une bonne base de connaissances ou un modèle mental adéquat afin de rassembler et d'interpréter des éléments de données disparates. Un novice ou une personne confrontée à un nouveau type de situation peut ne pas disposer de ces bases de connaissances et sera donc nettement désavantagé pour développer le niveau 2 de sa CS.

La dernière étape est celle de la **projection** (niveau 3 de la CS). L'individu doit être capable de prédire, au moins à court terme, l'évolution des éléments après connaissance et détermination de leur signification par rapport à l'objectif courant. Pour qu'un individu atteigne le niveau

3 de la CS, il est nécessaire qu'il dispose d'une bonne compréhension de la situation et du fonctionnement de la dynamique du système avec lequel il travaille ou interagit. Ce niveau permet d'être proactif dans la prise de décision. L'utilisation de la compréhension de la situation actuelle pour former des projections nécessite un modèle mental développé et approprié de la tâche. Toutefois, une projection correcte de la situation peut augmenter significativement la charge cognitive de l'individu. En se projetant constamment dans l'avenir, un expert est capable de développer un ensemble de stratégies et de réponses aux événements. Cela permet d'éviter de nombreuses situations indésirables et de réagir très rapidement lorsque divers événements se produisent. L'incapacité à se projeter avec précision à partir du niveau 2 de la CS peut être due à des ressources mentales insuffisantes (si la personne est surchargée par d'autres traitements d'informations) ou à une connaissance insuffisante du domaine. Souvent, cela est également dû à une projection erronée, voir naïve, des tendances actuelles.

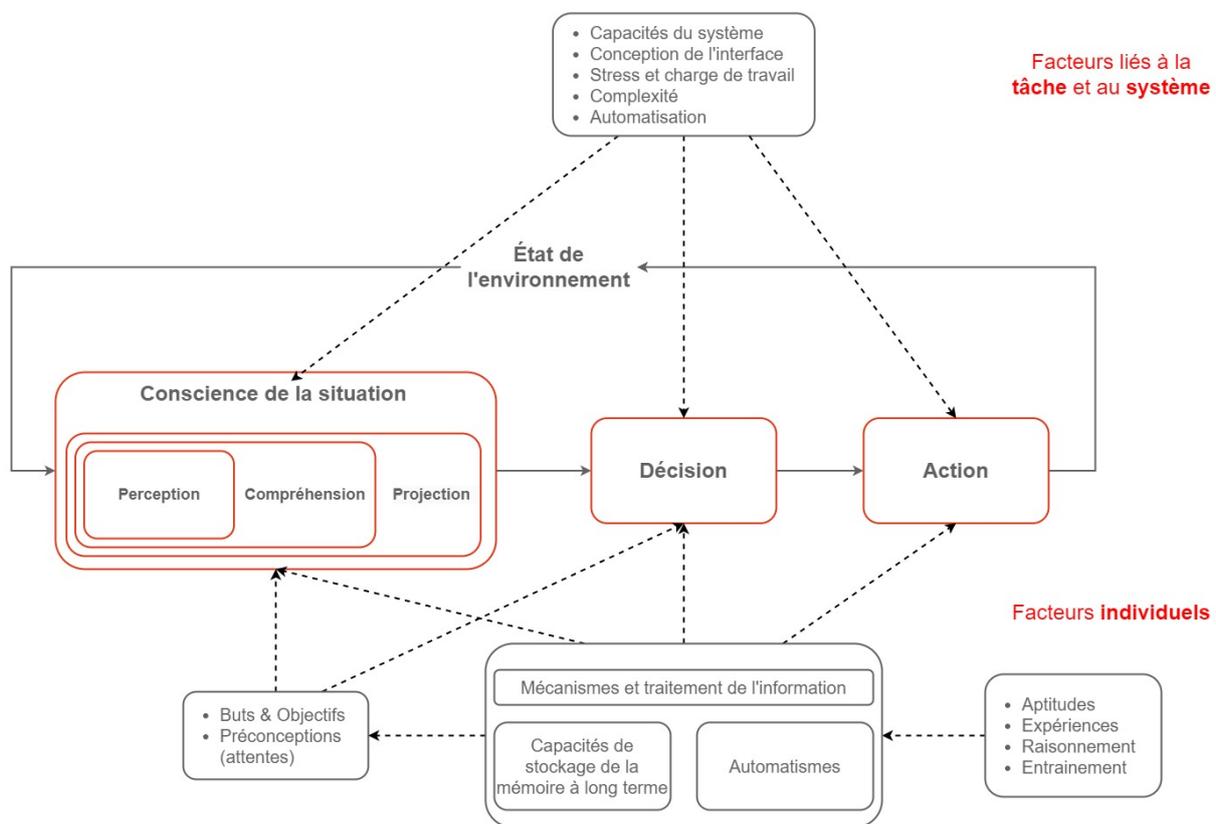


FIGURE 1.12 – Modèle détaillé de la CS de Endsley (1995b).

Il est important de retenir que la CS est un processus dynamique tout au long de la réalisation d'une tâche. Ainsi, améliorer la projection de l'état futur d'un élément de l'environnement de travail au temps t renforcera l'attention portée à ce même élément au temps $t+1$ si cela est nécessaire. Par exemple, si l'on projette qu'un robot va se déplacer dans un futur relativement proche, on y portera attention quand il initiera son mouvement.

Dans son ensemble, la CS est dépendante de nombreux facteurs individuels et de facteurs liés à la tâche et au système (voir figure 1.12). Au niveau des facteurs individuels, elle peut être limitée par les mécanismes de traitement de l'information, les capacités de mémoire à long terme et les comportements automatisés. Ces facteurs sont modérés par les aptitudes, l'expérience et l'entraînement des individus. Les buts et les objectifs des individus ainsi que leurs attentes liées à la tâche ont aussi une influence sur la CS au cours d'une tâche. Concernant

les facteurs liés à la tâche, la CS est influencée par les capacités du système, la conception de l'interface, le stress et la charge de travail induits par la tâche ainsi que la complexité et l'automatisation (Endsley, 2016).

1.3.2 Les mécanismes cognitifs impliqués dans la conscience de situation

Concernant les processus cognitifs, la CS est soutenue par les capacités de perception, d'attention, de mémoire (à long terme et de travail) et de synthèse et d'analyse en lien avec la métacognition (Endsley et al., 2000). L'ensemble de ces processus permettent à l'individu de générer une représentation interne de la situation à l'aide de leurs buts, de leurs attentes, de leurs modèles mentaux et de leur schémas.

Les objets et leurs caractéristiques sont d'abord traités simultanément par le traitement sensoriel pré-attentif (Treisman, 1985). La capacité d'une personne à percevoir plusieurs éléments simultanément est limitée par son attention. Les éléments qui requièrent une attention fréquente en raison de leur importance ou de leur vitesse de changement sont généralement surveillés le plus souvent. Si certaines informations peuvent être plus facilement traitées simultanément (par exemple, les informations sonores et visuelles), il est difficile de traiter simultanément d'autres types d'informations. Si l'information provient de la même modalité sensorielle, fait appel aux mêmes ressources ou requiert le même mécanisme de réponse, il est plus difficile d'y prêter attention simultanément.

La mémoire de travail joue un rôle essentiel dans la réalisation de la CS. Les individus peuvent y stocker temporairement des informations. Seule une quantité limitée d'informations non liées peut être conservée et manipulée dans la mémoire de travail (7 plus ou moins 2). Les informations nouvellement perçues sont combinées aux connaissances existantes dans la mémoire de travail pour actualiser un modèle mental existant ou en construire un nouveau de la situation changeante. Ces éléments d'information sont également traités et utilisés pour créer des projections de ce qui pourrait se produire dans le futur. Ces projections, à leur tour, aident la personne à décider des actions à entreprendre en conséquence.

La mémoire à long terme permet aux individus de contourner les limites que la mémoire de travail impose à la CS. Les structures de la mémoire à long terme, connues sous le nom de schémas et de modèles mentaux, jouent un rôle important dans l'amélioration de la CS d'une personne. Les modèles mentaux ont été définis comme « des mécanismes par lesquels les humains sont capables de générer des descriptions de l'objectif et du fonctionnement du système, des explications du fonctionnement du système et des états du système observés, et des prédictions des états de la structure » (Rouse & Morris, 1986). Ils aident la personne à déterminer les informations auxquelles il est important de prêter attention et à former des attentes. Les schémas sont des états prototypiques du modèle mental qui permettent d'améliorer l'efficacité du traitement.

Lorsque les individus disposent d'un modèle mental entièrement développé pour un système spécifique, ou un domaine, le modèle mental fournit trois choses : une direction dynamique de l'attention vers des signaux environnementaux critiques, des attentes concernant les états futurs de l'environnement basées sur le mécanisme de projection du modèle, et un lien direct en une seule étape entre les classifications de situations reconnues et les actions types, permettant de prendre des décisions très rapides (Endsley, 2016).

1.3.3 Les démons de la conscience de situation

Plusieurs mécanismes ou facteurs qui peuvent être à l'œuvre pour modifier ou altérer un ou plusieurs niveaux de la CS ont été mis en évidence dans la littérature (Endsley, 2016). Ils sont appelés « démons de la CS » et sont classés en huit catégories :

1. **Le modèle mental errant** (errant mental model) qui concerne l'utilisation d'un modèle mental incomplet ou erroné, résultant d'une mauvaise interprétation de l'information ou d'une habitude prise dans un contexte plus ou moins similaire ;
2. **Le syndrome hors de la boucle** (out-of-the-loop syndrome) qui apparaît lorsqu'un niveau d'automatisation trop élevé rend la tâche hermétique pour la personne et qu'elle ne peut plus agir de manière adéquate ;
3. **La tunnélisation attentionnelle** (attentional tunneling) qui correspond au fait de se focaliser sur une zone ou un problème tout en ignorant les signaux d'autres zones ou problèmes ;
4. **La saillance inappropriée** (misplaced salience), qui correspond à l'utilisation de signaux d'alarme de manière répétée ou erronée ;
5. **La charge de travail, l'anxiété, la fatigue et autres facteurs de stress** (Workload, Anxiety, Fatigue and Other Stressors - WAFOS) qui correspond à la charge de travail, l'anxiété, la fatigue et d'autres facteurs liés au stress ;
6. **La complexité du système** (complexity creep) qui rend difficile la construction d'une représentation suffisante du fonctionnement du système ou de l'outil pour la personne ;
7. **La surcharge de données** (data overload), qui correspond au fait de devoir traiter une quantité de données ou une fréquence d'apparitions de données trop importante pour la personne ;
8. **Le piège de la mémoire requise** (requisite memory trap) qui survient si les systèmes reposent trop sur les capacités de mémoire de travail des utilisateurs.

La plupart de ces démons ont pour origine plusieurs facteurs externes et individuels. Pour les facteurs externes, la conception de l'interface et sa complexité sont parmi les facteurs essentiels qui ont un impact sur la CS. Du côté des facteurs individuels, on retrouve l'expérience, l'entraînement et les capacités cognitives de la personne comme la mémoire de travail ou la mémoire à long terme qui peuvent eux aussi dégrader la CS.

Enfin, cinquante principes de conception pour lutter contre les démons et soutenir la CS ont été proposés (Endsley, 2016). Ces principes concernent des exigences spécifiques telles que la communication à propos de l'incertitude du processus, la diminution de la complexité et l'utilisation d'alarmes. Les données sont présentées en fonction des objectifs des opérateurs (goal-directed tasks) plutôt que de la technologie. Les auteurs soulignent l'importance d'assister la phase de compréhension en fournissant directement des informations appropriées au niveau 2 de la CS. Il est recommandé que les interfaces communiquent à propos de la fiabilité des capteurs et soient limitées en nombre de caractéristiques potentiellement distrayantes afin qu'elles soient spécifiquement orientées vers les objectifs des opérateurs.

1.3.4 Méthode de mesures de la conscience de situation

L'évaluation de la CS est rendue complexe par sa nature de processus cognitif et interne (Endsley, 1995b). Du fait qu'elle dépende principalement des représentations mentales de la

situation de l'individu, il est ainsi difficile d'en obtenir une mesure fiable et certaine. Une méthode courante pour associer la CS à une métrique est de l'inférer à partir d'autres concepts plus simples à mesurer (Endsley & Garland, 2000), comme l'attention (Endsley & Rodgers, 1996; Wickens, 2007) ou la performance à la tâche (Salas et al., 1995; Orique & Despins, 2018), ou en essayant d'obtenir une évaluation directe de l'opérateur (Endsley, 2016). Différentes approches de méthodes de mesures de la CS ont été exposées dans la littérature (Endsley, 1995a). Elles comportent des mesures physiologiques (grâce à des capteurs), des mesures de performances (mesures externes et intégrées de la performance aux tâches), des méthodes subjectives (observation ou personnelle), des questionnaires (après essai ou pendant l'essai) et des méthodes d'interrogation en interrompant la tâche.

1.3.4.1 Questionnaires de mesures de la conscience de situation

D'après la littérature, deux méthodes sont couramment employées pour évaluer la CS (Endsley et al., 1998). La première est le Situation Awareness Global Assessment Technique (SAGAT), une méthode objective qui fait appel à un questionnaire préparé à l'avance et adapté à la tâche à accomplir (Endsley, 1988b). L'administration du SAGAT consiste en l'interruption de la tâche de l'individu à des moments sélectionnés aléatoirement et à l'interrogation de ce dernier à-propos de sa perception courante de la situation. Les réponses des personnes sont ensuite comparées à la situation réelle au moment de l'arrêt afin d'en obtenir une mesure objective de la CS. La comparaison donne lieu à une notation qualitative des réponses : correcte ou incorrecte.

La seconde est le questionnaire Situation Awareness Rating Technique (SART) (voir annexe A), une méthode d'évaluation subjective reposant également sur un questionnaire (Taylor, 2017). L'administration de ce questionnaire se fait après la tâche et est composé de 10 questions qui évaluent la demande attentionnelle de la tâche (instabilité, variabilité et complexité de la situation), le soutien à la réserve attentionnelle de l'individu pendant la tâche (éveil, capacité mentale de réserve, concentration et division de l'attention) et sa compréhension de la situation (quantité et qualité de l'information et familiarité). Les participants doivent évaluer chaque dimension sur une échelle de Likert à sept points (1 pour faible et 7 pour élevé). Au terme de l'évaluation, un score est calculé à l'aide des scores de chaque dimension du questionnaire par la méthode suivante :

$$\text{Score SART} = \text{Compréhension} - (\text{Demande} - \text{Soutien})$$

Le score de compréhension est composé de trois questions, celui de la demande de trois questions et celui de soutien de quatre questions. Chacun de ces scores est calculé en faisant la somme des réponses à chaque question de chacune des dimensions. De ce fait, les scores du questionnaire SART sont compris dans l'intervalle $[-14; 46]$.

Toutefois, ces méthodes introduisent une divergence écologique en nécessitant une interruption de la tâche pour l'évaluation (Endsley, 2020; Salmon et al., 2009). Le SAGAT, par sa nature, ne peut être utilisé que dans des environnements simulés (Endsley, 1995a). Le SART peut-être administré dans des environnements réels, mais ne mesure la CS qu'après la tâche. Cela limite les possibilités d'estimer en temps réel la CS. Aussi, c'est une mesure subjective et son interprétation souffre donc de l'influence de la performance perçue par l'individu ou de sa performance attendue (Endsley, 1995a; Endsley et al., 1998).

1.3.4.2 Mesures comportementales et physiologiques de la conscience de situation

Une piste explorée dans la littérature consiste à utiliser des mesures comportementales (McKerral & Pammer, 2021) et physiologiques (Bracken et al., 2021), notamment l'oculométrie, l'activité cardio-vasculaire grâce au rythme cardiaque et à la variabilité du rythme cardiaque (HRV), l'électroencéphalographie (EEG) et l'activité électrodermale (EDA) (Zhang et al., 2020).

Dans une revue systématique des mesures physiologiques de la CS, les auteurs ont identifié seize études pertinentes intégrant l'oculométrie, six associant la CS à l'activité cardio-vasculaire indirecte, trois utilisant des mesures liées à l'EEG et une utilisant l'EDA (Zhang et al., 2020). Toutes les études incluses dans la revue ont également effectué des évaluations directes de la CS. Elles ont comptabilisé l'utilisation du SAGAT dans quatorze études et du SART dans dix études. Une corrélation positive entre les évaluations directes de la CS et la CS évaluée par des mesures oculométriques a été démontrée avec le SART (Paletta et al., 2017; Hasanzadeh et al., 2018) et SAGAT (Merchant et al., 2001; Paletta et al., 2017; de Winter et al., 2019).

Différentes métriques peuvent être évaluées à l'aide de système de suivi oculaire (Zhang et al., 2020). Certaines d'entre elles concernent les aspects inconscients des mouvements oculaires, c'est-à-dire les activités involontaires en réponse à des stimuli environnementaux, telles que la vitesse de clignement des yeux (Liu et al., 2014; Rouwhorst et al., 2017; Wu et al., 2018) et la dilatation des pupilles (Liu et al., 2014; Wu et al., 2018). D'autres correspondent à des aspects plus conscients des mouvements oculaires, par exemple le partage de l'attention visuelle, le plus souvent à l'aide des fixations (Wu et al., 2018; Van De Merwe et al., 2012; Hasanzadeh et al., 2018; Moore & Gugerty, 2010; Desvergez et al., 2019) et des saccades oculaires (Liu et al., 2014; Wu et al., 2018; Law et al., 2020). Les mesures de partage de l'attention visuelle impliquent souvent une zone d'intérêt définie, la durée moyenne de fixation dans une zone d'intérêt (Moore & Gugerty, 2010; Desvergez et al., 2019; Law et al., 2020) et le pourcentage de temps passé dans une zone d'intérêt Moore & Gugerty (2010); Dreyer et al. (2014).

Il faut cependant garder à l'esprit que les mesures d'oculométrie peuvent être affectées par de nombreux facteurs personnels ou externes comme le genre, l'anxiété ou les fluctuations de la lumière (Janisse, 1977; Kruger et al., 2013; Zavagno et al., 2017). Aussi, certaines de ces mesures, notamment celles liées à la dilatation de la pupille peuvent être dues à une augmentation de la charge de travail cognitive, ce qui peut être trompeur lorsque l'on souhaite estimer la CS. Même s'il existe un lien entre CS et charge de travail, il faut rester prudent quant à l'interprétation de ces métriques (Wickens, 2008).

1.3.5 Conscience de situation d'équipe

La CS n'est pas un facteur à prendre en compte seulement au niveau individuel mais aussi au sein d'une équipe de travailleurs. En effet, il est rare qu'un individu travaille seul sur une tâche dans un système complexe. Une équipe est considérée comme un ensemble de partenaires auxquels l'état mental de l'intention commune peut être attribué. L'intention commune est définie comme un engagement conjoint à réaliser une action collective dans un certain état mental partagé (Cohen & Levesque, 1991). D'autres auteurs parlent d'un « ensemble distinct de deux personnes ou plus qui interagissent de manière dynamique, interdépendante et adaptative en vue d'atteindre un but, un objectif ou une mission commune et apprécié(e), qui se sont vu assigner des rôles ou des fonctions spécifiques et qui ont une durée de vie limitée en tant que membres » (Salas et al., 1992). De ces définitions, nous pouvons mettre en évidence trois points majeurs. D'abord, les équipes partagent un objectif commun, les individus doivent disposer de

rôles spécifiques et enfin, ces rôles doivent être interdépendants (Endsley, 2016).

Pour qu'une équipe soit efficace, elle doit disposer d'un haut niveau de CS d'équipe. Cette dernière est représentée par la CS de chaque individu appartenant à l'équipe. La CS d'équipe est définie comme « la mesure dans laquelle chaque membre de l'équipe possède la CS nécessaire à l'exercice de ses responsabilités » (Endsley, 1995b). En accord avec cette définition, le succès ou l'échec d'une équipe dépend du succès ou de l'échec de chacun des membres de l'équipe. Si l'un d'entre eux possède une mauvaise CS, cela peut mener à une erreur critique qui peut nuire à l'efficacité de toute l'équipe. Un point souligné concerne l'importance que chaque membre de l'équipe doit disposer de la CS dont il a besoin pour sa propre tâche (Endsley, 2016). Enfin, une composante importante de la CS d'équipe est le degré de CS partagé entre chaque membre de l'équipe. La CS d'équipe peut être vue comme la coordination des perceptions et des actions (Gorman et al., 2017).

La CS partagée est définie comme « la mesure dans laquelle les membres de l'équipe possèdent la même CS sur les exigences partagées de la CS » (Endsley & Jones, 1997; Endsley, 2001). Ici, il ne s'agit pas du partage total de la CS de chaque individu avec ses partenaires mais seulement du partage des informations nécessaire à leur objectifs. Sans CS partagée, la coordination de l'équipe peut être insuffisante et la CS individuelle nécessaire à une bonne prise de décision peut faire défaut. Ainsi, la CS partagée fait référence à la mesure dans laquelle les personnes ont une compréhension commune des informations qui sont dans le chevauchement des exigences de CS des membres de l'équipe. Il n'est pas nécessaire de partager toutes les informations. Chaque membre de l'équipe est au courant de beaucoup de choses qui ne sont pas pertinentes pour les autres membres de l'équipe. Seules les informations qui sont pertinentes pour les exigences de la CS de chaque membre de l'équipe doivent être partagées. Il s'agit alors d'avoir connaissance de ce que savent les autres et de ce qu'ils ont besoin de savoir. La CS d'équipe est aussi définie comme l'ensemble des informations individuelles et partagées, sur l'ensemble des connaissances de l'état et de l'équipe et de la situation (Salmon et al., 2008).

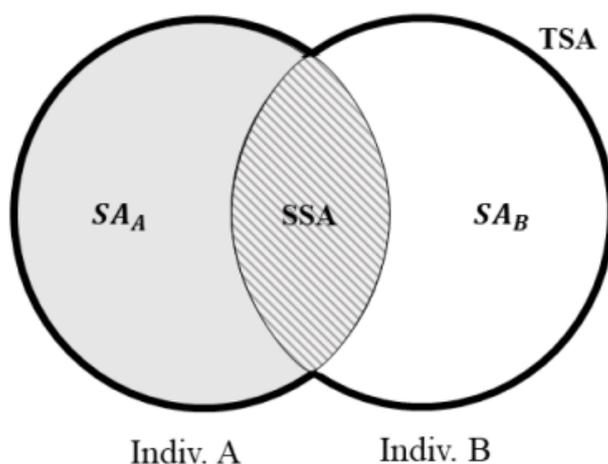


FIGURE 1.13 – CS d'équipe et CS partagée tiré de Prébot (2020). SA : Situation Awareness (CS individuelle), SSA : Shared Situation Awareness (CS partagée), TSA : Team Situation Awareness (CS d'équipe)

La CS de l'équipe dans son ensemble dépend donc à la fois d'un niveau élevé de CS chez les individus de l'équipe, pour les aspects de la situation nécessaires à leur travail, et d'un ni-

veau élevé de CS partagée entre les membres de l'équipe, fournissant une image opérationnelle commune précise des aspects de la situation communs aux besoins de chaque membre (Endsley, 2001). La CS de l'équipe et la CS partagées sont renforcées par quatre facteurs : les exigences, les dispositifs, les mécanismes et les processus de la CS de l'équipe (Endsley, 2001).

1. **Exigences de la CS de l'équipe** - le degré auquel les membres de l'équipe savent quelles informations doivent être partagées, y compris leurs évaluations et projections de haut niveau (qui ne sont généralement pas accessibles aux autres membres de l'équipe), et les informations sur l'état d'avancement des tâches et les capacités actuelles des membres de l'équipe.
2. **Dispositifs de la CS de l'équipe** - les dispositifs disponibles pour partager ces informations, qui peuvent inclure la communication directe (verbale et non verbale), des affichages partagés (par exemple, des affichages visuels ou sonores, ou des dispositifs tactiles), ou un environnement partagé. Étant donné que la communication non-verbale, telle que les gestes et l'affichage d'objets locaux, et un environnement partagé ne sont généralement pas disponibles dans les équipes distribuées, l'accent est mis sur la communication verbale et les technologies de communication pour créer des affichages d'informations partagées.
3. **Mécanismes de CS de l'équipe** - la mesure dans laquelle les membres de l'équipe possèdent des mécanismes, tels que des modèles mentaux partagés, qui soutiennent leur capacité à interpréter les informations de la même manière et à faire des projections exactes concernant les actions des autres. La possession de modèles mentaux communs peut grandement faciliter la communication et la coordination au sein d'une équipe.
4. **Processus de la CS de l'équipe** - la mesure dans laquelle les membres de l'équipe s'engagent dans des processus efficaces de partage des informations de la CS qui peuvent inclure une remise en question des hypothèses, de vérification des informations ou des perceptions contradictoires, de mise en place d'une coordination et d'une priorisation des tâches, et d'établissement d'un plan d'urgence, entre autres.

Le modèle de CS d'équipe tel que décrit par Endsley (2001) fait écho à la théorie de l'action jointe présentée précédemment en section 1.2. Le premier élément de la liste, à savoir les exigences, rappelle la notion de partage des représentations mise en avant dans la théorie. Les dispositifs de la CS de l'équipe concernent tous les moyens de communications accessibles à chacun des agents pour partager des informations. Ensuite, les mécanismes correspondent à la prédiction des actions des partenaires et l'intention jointe. Pour finir, les processus évoquent la coordination des actions entre tous les membres de l'équipe dans le but d'accomplir l'action jointe.

1.3.6 Conclusion intermédiaire

Nous avons vu que la CS était un processus cognitif essentiel de la prise de décision et de réalisation d'actions dans un contexte dynamique. Elle se décline en trois niveaux : la perception, la compréhension et la projection. Aussi, la CS dépend d'une multitude d'autres processus cognitifs comme la perception, l'attention, la mémoire et des capacités de synthèse, d'analyse et de métacognition. Elle peut-être dégradée par huit mécanismes identifiés dans la littérature, appelés *démons de la CS*, dont l'origine dépend de facteurs externes ou individuels. De par sa nature, la CS est un processus complexe à évaluer. La plupart des méthodes d'évaluation que l'on trouve dans la littérature sont des questionnaires administrés pendant ou après les tâches.

Depuis ces dernières années, de nombreux chercheurs s'intéressent à l'utilisation de mesures physiologiques et comportementales pour l'évaluer en temps réel ou à posteriori. Pour finir, nous avons vu que la CS n'était pas seulement un processus à prendre en compte au niveau individuel mais aussi au sein d'une équipe. Notamment, nous avons discuté des points communs entre les notions de CS d'équipe et d'action jointe.

1.4 Prise en compte de la conscience de situation dans l'interaction et la collaboration Humain-Robot

1.4.1 Conscience de situation et Interaction Humain-Robot

Dans le cadre de la CHR, l'équipe n'est plus seulement composée d'humains mais aussi de robots. Les opérateurs doivent alors intégrer les robots dans leur propre CS et de celle de l'équipe. Les robots doivent, dans leur cas, fournir des informations adéquates à la construction de la CS de leurs partenaires humains, notamment par le biais d'interfaces (Marvel et al., 2020; Riley et al., 2016).

Dix lignes directrices pour la conception d'IHR ont été proposées dans la littérature (Marvel et al., 2020). Les recommandations des auteurs visent à aider les chercheurs à développer des technologies d'interface et d'interaction efficaces, à maximiser la CS des opérateurs dans les équipes de collaboratives humain-robot, à promouvoir des rapports de diagnostic efficaces sur les processus et les systèmes, et à permettre des réponses plus rapides aux erreurs d'équipement ou d'application. Ces recommandations sont inspirées des cinquante recommandations de conception dirigée vers la tâche proposées par Endsley (2016) :

1. l'interface doit être développée en suivant un processus de conception centrée-utilisateur ;
2. l'automatisation doit être utilisée de façon minimale et ne concerner que des opérations qui nécessitent des actions de routine ;
3. l'état du robot et de la tâche doivent être communiqués graphiquement à l'opérateur et ce, de manière continue et pertinente ;
4. l'opérateur doit pouvoir intervenir dans la boucle d'action du robot pour assurer la sécurité ou atténuer des problèmes imprévus ;
5. les changements sur l'interface ou la tâche ne doivent pas nécessiter de formation trop complexe pour l'utilisation du robot par l'opérateur ;
6. l'attention de l'opérateur doit être soutenue en hiérarchisant et en facilitant les communications, les tâches et les échanges entre les membres de l'équipe ;
7. l'opérateur doit pouvoir interagir ou contrôler efficacement plusieurs robots à la fois ;
8. les informations issues de plusieurs capteurs doivent être fusionnées de manière synthétique avant d'être présentées à l'opérateur ;
9. l'opérateur doit pouvoir décider de la manière dont les informations lui sont présentées ;
10. l'opérateur doit pouvoir manipuler le robot de manière intuitive dans l'environnement de travail ;

Cinq recommandations d'amélioration de l'IHR dans le but de soutenir la CS à l'aide d'interfaces, notamment pour des robots contrôlés à distance ont aussi été mises en évidence (Riley et al., 2016) :

1. elles doivent tenir comptes des exigences perceptives, cognitives et physiques imposées par la performance de la tâche par l'opérateur ;
2. l'utilisation de l'automatisation doit être faite en mettant l'accent sur les objectifs de l'opérateur humain, et ce, en suivant une approche de conception centrée utilisateur ;
3. elles doivent maintenir la CS dans l'environnement de l'opérateur et aussi dans l'environnement du robot ;
4. elles doivent s'adapter aux variabilités intra et inter-individuelles des opérateurs ;
5. elles doivent permettre de faciliter la capacité des opérateurs à intégrer les informations perçues pour parvenir à une compréhension globale de la situation.

Dans la littérature, l'étude de la CS est souvent associée à l'automatisation des robots (Kaber & Endsley, 2004; Gombolay et al., 2017; Hopko et al., 2021; Roy et al., 2023). Il a été montré qu'une automatisation intermédiaire facilite une CS plus élevée des opérateurs sans nécessairement améliorer leurs performances ou diminuer leur charge de travail (Kaber & Endsley, 2004). Il a aussi été suggéré de doter les robots d'un niveau d'autonomie inférieur à celui dont ils sont réellement capables afin de préserver l'autonomie des individus (Roy et al., 2023). Il a été suggéré le fait que la conscience qu'ont les participants humains des actions de leur équipe diminue à mesure que le degré d'autonomie du robot augmente (Gombolay et al., 2017). Les auteurs suggèrent que les opérateurs conservent le pouvoir de décision principal lorsqu'il s'agit de répartir des tâches avec un partenaire robotique et qu'il y a de fortes chances qu'ils aient à intervenir souvent pour ajuster au fur et à mesure l'allocation des tâches. A l'inverse, dans le cas où peu d'interventions de l'humain seraient nécessaires, les auteurs recommandent de donner l'autorité d'allocation de tâches au robot pour maximiser l'efficacité de l'équipe humain-robot. Enfin, il a été observé, par des mesures d'HRV, que l'augmentation de l'assistance du robot réduisait l'approvisionnement attentionnel et l'engagement dans la tâche des participants conduisant alors les opérateurs à disposer d'une CS dégradée (Hopko et al., 2021).

D'autres travaux se concentrent sur le fait de rendre les robots plus transparents (Lyons, 2013) afin d'améliorer la CS des opérateurs (Chen et al., 2014, 2018a). Dans leurs travaux, les auteurs ont présenté le modèle de transparence de l'agent basé sur la CS (Situation awareness-based Agent Transparency Model - SAT), conçu pour aider les opérateurs dans les équipes humain-agent (voir figure 1.14). Ce modèle comprend trois niveaux permettant à un opérateur de comprendre le processus de raisonnement sous-jacent à l'action et l'aidant dans sa prise de décision (Chen et al., 2018a). Le modèle est composé de trois niveaux indépendants qui soutiennent respectivement les niveaux de perception, de compréhension et de projection du modèle de Endsley (1995b) :

1. Niveau 1 - Buts & Actions : l'agent fournit à l'opérateur les informations de base sur son état actuel et ses objectifs, intentions et plans.
2. Niveau 2 - Raisonnement : l'agent indique son processus de raisonnement ainsi que les contraintes et les possibilités qu'il prend en compte lorsqu'il planifie ses actions.
3. Niveau 3 - Projection : l'agent fournit à l'opérateur des informations concernant ses projections d'états futurs, les conséquences prévues, la probabilité de succès ou d'échec et toute incertitude associée aux projections mentionnées.

Pour finir, d'autres chercheurs ont tenté d'estimer ou d'évaluer la CS des opérateurs en temps réel lors de scénarios d'interaction avec des robots (Dini et al., 2017; Buehler & Weisswange, 2018; Régis et al., 2014). Une méthodologie pour mesurer et prédire la CS en temps

Modèle de transparence des agents basé sur la CS (SAT)

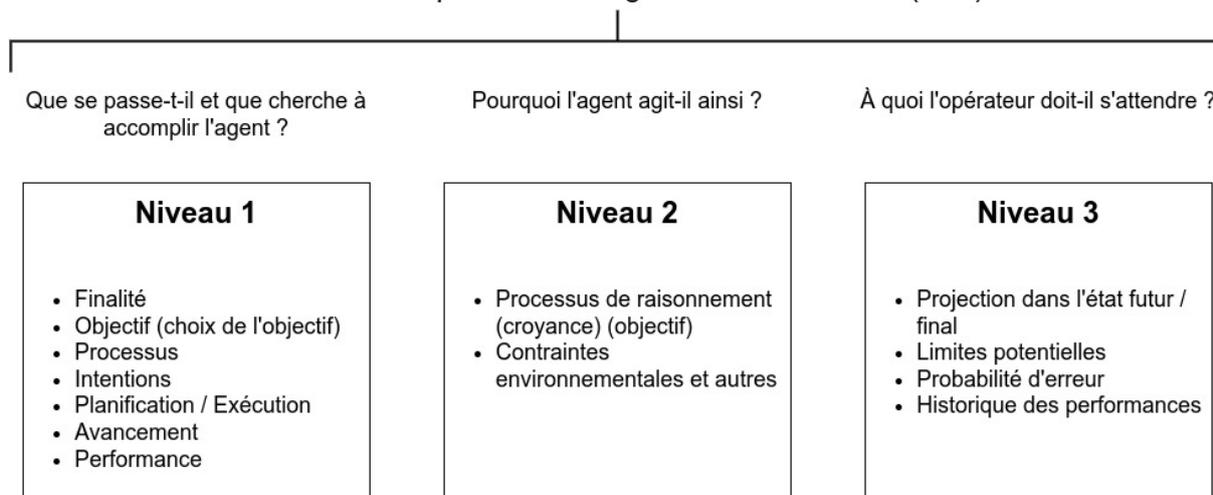


FIGURE 1.14 – Modèle de transparence des agents basé sur la conscience de situation proposé par Chen et al. (2014).

réel à l'aide de mesures oculométriques a été proposée (Dini et al., 2017). Le travail des auteurs montrent qu'en prédisant la CS, ils sont aussi capables de prédire la performance à une tâche d'IHR. Une méthode d'inférence de la croyance d'un humain pour estimer sa CS a également été proposée dans la littérature (Buehler & Weisswange, 2018). Le système utilisé a permis de fournir des prédictions de l'action humaine et des informations à propos de la CS des participants. Enfin, une méthode d'inférence par apprentissage automatique pour détecter des états de tunnélisation attentionnelle à partir de données psychophysologiques et oculométriques a été développée (Régis et al., 2014).

1.4.2 Proposition d'un modèle de prise en compte de la conscience de situation par un robot

En vue de compléter cette revue de la littérature, nous souhaitons proposer un modèle de la prise en compte de la conscience de la situation dans le contexte de la collaboration humain-robot. Ce modèle (voir figure 1.15) s'appuie sur les connaissances présentées dans ce premier chapitre du manuscrit. Il s'agit ici d'une synthèse des travaux et des modèles présentés dans les sections 1.1 à 1.4.

Le modèle proposé comprend un environnement de travail dynamique dans lequel une tâche jointe est réalisée par un humain et un système robotique. Ce modèle n'a pas prétention à être exhaustif à propos des processus de traitement de l'information de l'humain et du système robotique. Nous souhaitons avant tout proposer une version simplifiée de notre vision et ne traiter que de la prise en compte de la CS de l'humain par un robot.

Dans ce modèle, l'humain et le robot partagent un environnement de travail et participent conjointement à une tâche. Chaque action réalisée par l'humain pendant la tâche jointe est le résultat de la décision prise à l'aide de sa CS (Endsley, 1995b). Il perçoit d'abord les éléments de son environnement de travail, dont le robot, comprend la signification de ses éléments et projette leurs états futurs selon l'action qu'il réalisera (voir section 1.3).

Pour le système robotique, les étapes de perception, de machine à état et de génération de

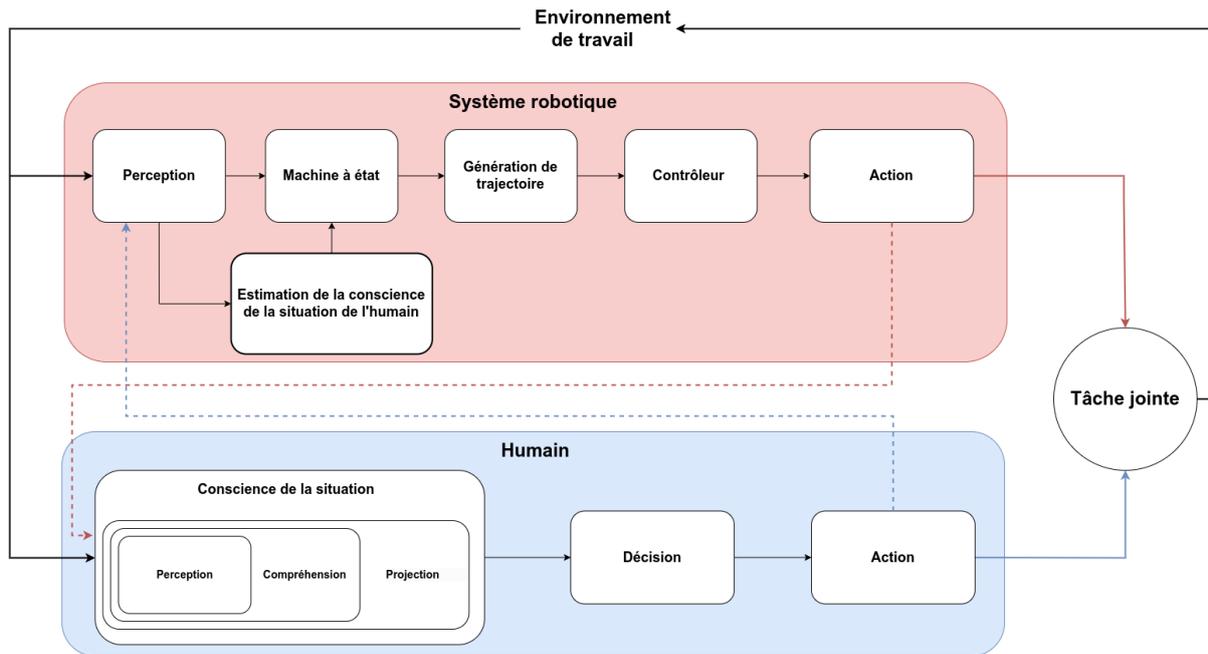


FIGURE 1.15 – Modèle de prise en compte de la conscience de situation par un robot.

trajectoire peuvent être vus comme un parallèle, informatisé, de la CS de l'humain. Le contrôleur agit comme une sorte d'imitateur de la prise de décision d'un humain. Le robot se met en mouvement pour exécuter l'action commandée par le contrôleur. Cette dernière a un effet sur l'environnement de travail et est perçue par le bloc de perception au tour suivant. Il peut aussi s'agir de communiquer avec le partenaire humain. Cette communication peut se faire grâce à une interface, des signaux visuels ou des alarmes, inclus dans le système robotique.

Une fois que l'humain ou le robot ont agi sur la tâche jointe, l'état de l'environnement de travail est modifié. Ce nouvel état est perçu par le système de perception de chaque agent (humain et système robotique). Au terme du processus de décision et d'action de chacun, l'état de la tâche change encore jusqu'à ce que la tâche soit terminée. Aussi, indépendamment de l'effet sur la tâche, l'action de chaque agent est perçue par le partenaire et peut modifier sa décision. Par exemple, si un humain voit le robot s'approcher d'un objet pour le saisir, il évitera alors de s'approcher de cet objet pour ne pas entrer en collision avec le robot.

La contribution principale de notre modèle réside dans le bloc « **Estimation de la conscience de situation de l'humain** ». Celle-ci peut se faire à partir des informations perçues : l'état de l'environnement, l'action de l'humain sur la tâche ou l'état courant de la tâche. Ces informations permettent au système robotique d'estimer la CS de l'humain. Cette estimation peut être qualitative ou quantitative selon les méthodes de mesures à disposition. Une fois estimée, la CS est traitée comme une information supplémentaire fournie à la machine à état. Elle vient ainsi influencer l'action réalisée par le robot afin de soutenir la CS de l'humain. Cette estimation permet d'une part d'évaluer la sécurité de l'opérateur et aussi de la soutenir si cela est nécessaire.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé un état de l'art des différentes thématiques nécessaire à la prise en compte de la CS dans le cadre de la CHR. Les différents concepts abordés ont pour vocation de proposer un contexte théorique aux travaux de ce manuscrit. Enfin, nous avons souhaité proposer une réponse à la question 1 :

Question 1.1

Comment modéliser la conscience de situation d'un humain afin qu'elle puisse être soutenue par les actions d'un robot dans le cadre de la collaboration humain-robot ?

En premier lieu, nous avons présenté la robotique collaborative en section 1.1. Nous avons discuté de son apport en comparaison avec la robotique industrielle traditionnelle et de la volonté de faire travailler des robots aux côtés des humains. Dans la section 1.2, nous avons présenté la théorie de l'action jointe, initialement issue de scénarios de collaboration entre, au moins, deux humains. Ce concept repose sur les capacités des individus à partager des représentations, prédire des actions et intégrer les effets prévus des actions de chaque partenaire. Nous avons vu que cette théorie pouvait aussi être valide dans le contexte de l'IHR et que cela nécessite de donner aux robots des capacités sociales d'interaction. Aussi, nous avons présenté les différents canaux de communications accessibles aux robots pour partager des informations avec leur partenaires humains pendant des actions jointes. Ensuite, nous avons présenté la notion de CS en section 1.3, en nous concentrant sur le modèle de Endsley (1995b) qui a guidé nos travaux de recherche. Il nous paraît nécessaire pour un humain de disposer d'une bonne CS en vue de réaliser une action jointe. En effet, posséder une bonne CS implique que l'individu possède la capacité d'orienter ses prises de décisions en fonction de ses buts prédéfinis et de ses modèles mentaux construits à partir des informations perçues dans l'environnement. Enfin, nous avons discuté des apports de la prise en compte de la CS en IHR dans la section 1.4. Nous avons présenté les différentes approches existantes de prise en compte de la CS en IHR et en CHR. Pour finir, nous avons proposé un modèle de prise en compte de la conscience de situation par un robot dans le contexte de la CHR (voir figure 1.15).

Ce modèle ouvre plusieurs perspectives quant à la prise en compte de la CS dans le contexte de la CHR. D'une part, nous pouvons nous demander en quelles circonstances la CS d'un individu peut être dégradée lorsqu'il interagit avec un robot. Cela pose aussi la question de la nature de l'altération de la CS. Dépend-elle de défaillances au niveau des facteurs individuels ou de ceux liés à la tâche et au système ? Ou alors est-ce en raison de défauts dans un des trois niveaux de la CS. Ces questions seront étudiées dans le chapitre 2. Dans celui-ci, nous présenterons une analyse d'accidents de robotique industrielle. Cette dernière a pour but d'identifier les facteurs de risques qui participent à dégrader la CS des opérateurs en interaction avec des robots dans des milieux industriels. Mettre en évidence ces facteurs nous permettra, par la suite, de trouver des moyens d'améliorer la sécurité des interactions.

En effet, grâce à l'identification de ces facteurs, nous serons en mesure d'étudier des solutions qui permettent de maintenir la CS des individus en interaction avec un robot. Néanmoins, quelle est la nature de ces solutions ? Doivent-elles être préventives ou réactives ? Des solutions préventives impliquent une prise en compte de la CS dès la conception d'une tâche voir de l'espace de travail en empêchant, dans la mesure du possible, le moindre défaut de CS. Des solutions réactives nécessitent de connaître à l'avance les potentiels risques de la tâche ou de

défaillance de la CS et de pouvoir réagir suffisamment vite pour les corriger. Cependant, il existe des défauts dans ces deux types de solutions. D'une part, pour les solutions de prévention, nous ne pouvons jamais être sûrs que l'individu réagira de la manière envisagée. L'étude des facteurs humains a montré qu'il était impossible de prévoir à l'avance tous les événements ou les situations qui peuvent survenir dès lors qu'un humain est présent. Ce manque d'exhaustivité contraint également les solutions réactives à des situations identifiées, mais se détériore dès lors qu'un imprévu se présente. Aussi, mettre en place des solutions réactives implique d'être capable de détecter des manques dans la CS des individus. Également, comment s'assurer que ces méthodes fonctionnent et permettent effectivement de soutenir la CS des individus ? Ces questionnements seront étudiés dans les chapitres 3 à 5 de ce manuscrit.

De plus, le modèle soulève une autre problématique concernant l'estimation, ou la quantification, de la CS. Comme nous avons pu le voir, il existe une multitude de mesures d'évaluation et d'estimation de la CS dans la littérature. En pratique, lesquelles de ces méthodes permettent réellement de qualifier, ou de quantifier, la CS des individus dans le contexte de la CHR ? Une estimation qualitative de la CS consisterait à lui attribuer des valeurs nominales ou ordinales. Celles-ci correspondraient par exemple à qualifier la CS selon la détection, ou non, de facteurs de dégradation ou bien de caractériser la CS comme étant faible, moyenne ou élevée. L'estimation nominale pourrait aussi être réalisée à l'aide de mesures physiologiques et comportementales et de mesures de performance à la tâche. Enfin, une mesure quantitative de la CS impliquerait de développer une métrique correspondante. Cela pose aussi la question de l'utilisation de l'estimation de la CS. Comment, en pratique, l'intégrer à la machine à état du système robotique ? De quelle nature est l'information à transmettre pour que le robot tienne compte de l'estimation de la CS dans la planification des actions à suivre ?

Chapitre 2

Accidents de robotique industrielle et manque de conscience de situation

Table des matières

Introduction	39
2.1 Interaction à risque entre l’humain et le robot	41
2.1.1 Défauts de sécurité en robotique industrielle	41
2.1.2 Le lien entre l’erreur humaine et la conscience de situation	42
2.1.3 Conscience de situation et analyse des accidents	43
2.1.4 Objectif et hypothèses	44
2.2 Méthode d’analyse des rapports d’accidents	44
2.2.1 La base de données EPICEA	44
2.2.2 Méthode d’analyse des rapports	44
2.2.3 Identification des démons	45
2.2.4 Exemple d’analyse d’un rapport	45
2.2.4.1 Division en phases	46
2.2.4.2 Analyse avec les démons de la conscience de situation	46
2.3 Résultats de l’analyse d’accidents	46
2.3.1 Les manifestations des démons de la conscience de situation	46
2.3.2 Séquences de démons de la conscience de situation dans ces accidents	47
2.4 Discussion	48
2.4.1 Démons de la conscience de situation et accidents de robotique industrielle	48
2.4.2 Schémas d’apparition des démons en robotique industrielle	50
2.4.3 Limites de l’étude	51
Conclusion	51

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté un état de l’art des différentes thématiques nécessaire à la prise en compte de la conscience de la situation (CS) dans le cadre de la collaboration humain-robot (CHR). Nous avons commencé par une présentation de la robotique col-

laborative et de son apport à la robotique industrielle. Nous avons poursuivi notre état de l'art en présentant la manière dont la collaboration humain-robot (CHR) s'inscrit dans l'interaction humain-robot (IHR). Nous avons souligné l'intérêt de doter les robots de capacités qui contribuent à favoriser la qualité de l'interaction en s'inspirant des interactions entre humains. En s'inspirant des théories de l'action jointe et de la transparence, le robot pourrait soutenir, grâce à ses moyens de communication, les capacités de prises de décisions d'un humain dans un contexte de CHR. Par la suite, nous avons introduit la conscience de la situation (CS) au travers du modèle de Endsley (1995b). En vue de participer à une action jointe, il nous paraît essentiel qu'un humain dispose d'une bonne CS. Cela implique que l'individu possède la capacité d'orienter ses prises de décisions en fonction de ses buts prédéfinis et de ses modèles mentaux construits à partir des informations perçues dans l'environnement. Nous avons relié les notions d'action jointe, de CS d'équipe et de partage de CS dans le cadre de la CHR. Enfin, nous avons proposé un modèle de prise en compte de la CS d'un humain par un robot dans le contexte de la robotique collaborative.

Une première étape de la prise en compte de la CS nécessite au préalable de cibler les facteurs qui contribuent à la dégrader dans la CHR. Néanmoins, la cobotique n'est encore que trop peu implantée dans les usines et, de ce fait, nous ne disposons pas de retour d'utilisation des robots collaboratifs en dehors des laboratoires. Comme nous l'avons vu dans la section 1.1.1, la cobotique est née de la volonté de faire collaborer des humains et des robots dans des espaces de travail partagés. Cette vision a pour but de contraster avec les applications traditionnelles de la robotique industrielle, dans lesquelles les robots sont isolés dans des cages limitant toute interaction avec des individus. Différentes études se sont intéressées aux accidents dans la robotique industrielle. L'erreur humaine (Jiang & Gainer Jr, 1987) et la prise de décision incorrecte par les opérateurs (Sugimoto & Kawaguchi, 1983; Jiang & Gainer Jr, 1987; Malm et al., 2010) sont parmi les causes d'accidents les plus citées. À notre connaissance, des défauts de CS n'ont jamais été cités parmi les causes d'accidents de robotique industrielle. Pourtant les situations dangereuses dans lesquelles l'individu a pris une mauvaise décision seraient dues, dans environ 80-85% des cas, à une dégradation de la CS (Endsley, 1995b). Aussi, comme nous avons pu le voir dans la section 1.3.3, huit facteurs, appelés *démons de la CS*, ont été mis en évidence dans la littérature (Endsley, 2016). Ces derniers peuvent être à l'œuvre pour altérer un ou plusieurs niveaux de la CS.

Dans ce chapitre, nous proposons d'analyser des rapports d'accidents de robotique industrielle issus de la base de données Etudes de prévention par l'informatisation des comptes-rendus d'enquêtes d'accidents (EPICEA)¹ de l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS). Nous utilisons les huit démons de la CS comme grille d'analyse des rapports d'accidents. Cette analyse a pour but de mettre en évidence les facteurs qui contribuent à la dégradation de la CS. Cela nous permettra par la suite d'avoir connaissances des potentielles situations à risques pour les opérateurs en interactions avec des robots industriels. L'identification des situations dangereuses dans la robotique industrielle, dans laquelle il ne doit pas y avoir d'interaction, apporte des connaissances pouvant être utilisées afin de sécuriser les interactions avec les cobots dans le contexte de la CHR. En effet, nous supposons que des phénomènes produits lors d'interactions entre humains et robots industriels sont amenés à se reproduire lors d'interactions entre humains et cobots.

Ce chapitre répond à la question 2 présentée en Introduction de ce manuscrit.

1. <https://www.inrs.fr/publications/bdd/epicea.html>

Question 2

Quels sont les facteurs de risques qui peuvent participer à la dégradation de la conscience de situation d'un opérateur en milieu industriel ?

Dans la section 2.1, nous présentons l'état de l'art concernant les interactions dangereuses entre l'humain et le robot, l'erreur humaine & la CS et l'analyse des accidents. Dans la section 2.2, la méthode que nous avons utilisée pour l'analyse des accidents est détaillée. À l'aide du mot-clé *robot*, 45 accidents ont été identifiés dans le domaine industriel. Chaque accident a été examiné et divisé en séquence d'évènements précédents l'accident. Chacune de ces séquences a ensuite été associée à un des démons de la CS lorsque cela était approprié. Nos résultats sont présentés dans la section 2.3. Ces derniers révèlent l'implication des démons de la CS dans les accidents de robotique industrielle analysés. Dans la section 2.4, ces résultats sont discutés à la lumière de notre objectif de prise en compte de la CS des opérateurs dans des cas de CHR. Enfin, les conclusions de ce travail sont présentées dans la section 2.4.3.

2.1 Interaction à risque entre l'humain et le robot

2.1.1 Défauts de sécurité en robotique industrielle

La sécurité est la caractéristique inhérente et la plus importante d'un robot qui doit travailler en étroite collaboration avec les êtres humains (De Luca & Flacco, 2012). La robotique industrielle est encadrée par deux normes de sécurité (ISO-10218-1, 2012; ISO-10218-2, 2011). La première, « Robots et dispositifs robotiques — Exigences de sécurité pour les robots industriels — Partie 1 : Robots » (ISO-10218-1, 2012) spécifie les exigences et les recommandations pour la prévention, les mesures de protection et les informations pour l'utilisation des robots industriels. Elle décrit les phénomènes dangereux de base associés aux robots et fournit des exigences pour éliminer ou réduire de manière appropriée les risques associés à ces phénomènes dangereux. La deuxième, « Robots et dispositifs robotiques — Exigences de sécurité pour les robots industriels — Partie 2 : Systèmes robots et intégration » (ISO-10218-2, 2011) spécifie les exigences de sécurité pour l'intégration des robots industriels et des systèmes robotisés tels que définis dans la norme ISO-10218-1 (2012). Les normes de sécurité visent à empêcher l'accès humain à l'espace de travail du robot ou à arrêter le robot lorsqu'un événement inattendu dans l'espace de travail est détecté par des capteurs externes (Meziane et al., 2014).

La plupart du temps, des accidents se produisent lorsqu'un individu doit effectuer une tâche à côté d'un robot (Malm et al., 2010). L'utilisation des mesures de sécurité actuelles peut s'avérer difficile lorsqu'une personne et un robot se trouvent à proximité. En effet, en ce qui concerne les robots conventionnels, bien qu'il soit interdit de s'approcher de la zone du robot, les opérateurs de tous types passent environ trois heures par jour à travailler près d'eux (Aghazadeh et al., 1993). Même si les interactions ne sont pas souhaitées, les opérateurs doivent effectuer des opérations de maintenance, de nettoyage, de dépannage, de réparation ou d'apprentissage du robot. Ils peuvent également travailler à proximité d'un robot opérationnel ou d'une cellule de travail robotisée. Toutes ces raisons conduisent à des situations dangereuses dans l'espace de travail du robot.

Un travail antérieur a décrit que la majorité des situations dangereuses étaient causées par l'intrusion d'opérateurs humains dans l'espace de travail du robot, tant pendant des phases opé-

rationnelles ou non opérationnelles (Sugimoto & Kawaguchi, 1983). La présence d'individus dans la cage du robot, en particulier pendant des phases opérationnelles, dénote d'une prise de risque ou de l'incompréhension du danger potentiel du robot. D'après les auteurs, 73% des blessures et des décès liés à des accidents ont pour cause un mouvement inhabituel et inattendu des robots (Sugimoto & Kawaguchi, 1983). Du point de vue de l'opérateur, cela se caractérise par la mauvaise interprétation de l'arrêt du robot et de la croyance erronée qu'un robot arrêté est un robot éteint. Cette dernière traduit d'une compréhension incorrecte de l'état du robot et, par conséquent, d'une CS dégradée de l'individu.

2.1.2 Le lien entre l'erreur humaine et la conscience de situation

Diverses méthodes ou outils sont utilisés pour analyser les activités humaines et les facteurs humains impliqués dans les accidents. Ils se concentrent sur le niveau de connaissance de l'opérateur (Rasmussen, 1983), sur les erreurs potentielles actives et latentes à l'origine des accidents (Reason, 1990), ou sur les causes humaines d'un accident et leur prévention (Shappell et al., 2007)). Toutefois, ces méthodes générales ne se concentrent pas suffisamment sur les aspects cognitifs de l'erreur humaine dans l'analyse des accidents. Le modèle de la CS de Endsley (1995b) peut être mis à profit pour atteindre cet objectif.

Selon Endsley, la CS peut être divisée en trois niveaux (Endsley, 1988a, 1995b). Le premier niveau (CS niveau 1) est lié à la perception des éléments présents dans l'environnement. Le deuxième niveau (CS niveau 2) est lié à la compréhension de la situation actuelle. Le troisième niveau (CS niveau 3) concerne la capacité à faire une projection de l'état futur, en déterminant les conséquences des actions ultérieures et l'évolution de tous les éléments de l'environnement. Une décision prise dans le contexte d'une conscience dégradée de la situation résulterait en une probabilité d'erreur humaine plus élevée (Suhir et al., 2015). En outre, huit mécanismes ou facteurs peuvent être à l'œuvre pour modifier ou altérer un ou plusieurs niveaux de la CS (Endsley, 2016). Ils sont appelés *démons de la CS* et chacun d'entre-eux peut concerner un ou plusieurs niveaux de la CS parmi la perception, la compréhension et la projection (Endsley, 2016; Stratmann & Boll, 2016). Endsley (2016) définit huit démons de la CS auxquels nous proposons d'ajouter des cas de la littérature en robotique en lien avec la robotique tirés de la littérature :

1. **Le modèle mental errant** (errant mental model) qui concerne l'utilisation d'un modèle mental incomplet ou mauvais résultant d'une mauvaise interprétation de l'information ;
Exemple : l'humain pense que le robot est éteint car il est inactif alors que ce dernier peut se remettre en activité à tout moment (Sugimoto & Kawaguchi, 1983).
2. **Le syndrome hors de la boucle** (out-of-the-loop syndrome) qui apparaît lorsqu'un niveau d'automatisation trop élevé rend la tâche hermétique pour la personne et qu'elle ne peut plus agir de manière adéquate ;
Exemple : l'opérateur et le robot effectuent une tâche en coopération mais l'humain ne sait ni pourquoi ni comment le robot effectue ses actions (Schuster et al., 2013).
3. **La tunnélisation attentionnelle** (attentional tunneling) qui correspond au fait de se focaliser sur une zone ou un problème tout en ignorant les signaux d'autres zones ou problèmes ;
Exemple : l'opérateur est concentré sur sa tâche dans un espace partagé et n'est plus conscient des actions ou des états du robot (Gateau et al., 2016).

4. **La saillance inappropriée** (misplaced salience), qui correspond à l'utilisation de signaux d'alarme de manière répétée ou erronée ;

Exemple : le robot et son environnement ne disposent pas de signaux lumineux qui indiquent son activité ou son état (Schillaci et al., 2013).

5. **La charge de travail, l'anxiété, la fatigue et autres facteurs de stress** (Workload, Anxiety, Fatigue and Other Stressors - WAFOS) qui correspond à la charge de travail, l'anxiété, la fatigue et d'autres facteurs liés au stress ;

Exemple : la répartition des tâches entre l'humain et le robot est trop inégale, ce qui va soit trop mobiliser l'opérateur et augmenter sa charge de travail, soit le désengager de la tâche et diminuer sa charge de travail (Koppenborg et al., 2017).

6. **La complexité du système** (complexity creep) qui rend difficile la construction d'une représentation suffisante du fonctionnement du système ou de l'outil pour la personne ;

Exemple : le fonctionnement du robot dépend de trop de systèmes et rend difficile voir impossible d'identifier un système faisant défaut en cas de problème (Malik & Bilberg, 2019).

7. **La surcharge de données** (data overload), qui correspond au fait de devoir traiter une quantité de données ou une fréquence d'apparitions de données trop importante pour la personne ;

Exemple : l'humain doit traiter rapidement un ensemble de signaux du robot ou de son interface (Riley & Endsley, 2004).

8. **Le piège de la mémoire requise** (requisite memory trap) qui survient si les systèmes reposent trop sur les capacités de mémoire de travail des utilisateurs.

Exemple : l'opérateur doit réaliser trop de sous-tâches et ne dispose pas d'interface ou d'aide de suivi de ses sous-tâches (Layner et al., 2009).

2.1.3 Conscience de situation et analyse des accidents

Des défauts de CS ont déjà été évoqués comme causes d'accidents dans les domaines aéronautique (Jones & Endsley, 1996; Endsley, 2016) et maritime (Stratmann & Boll, 2016). Dans l'aéronautique, 76,3% des erreurs ont été associés à des erreurs de perception (niveau 1 de la CS), 20,3% à des erreurs de compréhension (niveau 2 de la CS) et 3,4% à des erreurs de projection (niveau 3 de la CS). Dans le domaine maritime, les chercheurs ont montré qu'un accident peut impliquer plus d'un démon de la CS. Aussi, des défauts au niveau de la perception semblent être la cause la plus importante d'erreur humaine (Stratmann & Boll, 2016).

Concernant les accidents en robotique industrielle, les principales analyses ont portées sur l'erreur humaine et la conception du lieu de travail (Jiang & Gainer Jr, 1987; Malm et al., 2010), la mauvaise compréhension de l'état du robot (Or et al., 2009) et la présence d'opérateurs dans l'espace de travail du robot (Aghazadeh et al., 1993; Charpentier & Sghaier, 2012). Il a été exposé qu'une proportion importante des accidents de robotique industrielle se produit pendant la phase opérationnelle, à savoir lorsque le robot effectue une tâche (Charpentier & Sghaier, 2012). Enfin, l'implication potentielle des démons de la CS dans les accidents de robotique industrielle a été suggérée (Salotti & Suhir, 2019).

2.1.4 Objectif et hypothèses

Pour répondre à la question 2, nous proposons l'hypothèse suivante à partir de la littérature et du chapitre précédent :

Hypothèse 2.1

Les huit démons de la conscience de situation sont une grille d'analyse d'accidents de robotique industrielle.

Il s'agit d'analyser les rapports d'accidents de robotique industrielle en reliant les causes de ces accidents aux démons de la CS. À notre connaissance, l'analyse d'accidents de robotique industrielle et la CS n'ont pas encore été associées. Des études antérieures ont mis en évidence la responsabilité des erreurs humaines et de la conception des espaces de travail (Jiang & Gainer Jr, 1987; Malm et al., 2010). Aussi, un travail connexe a exposé le rôle des démons de la CS dans des accidents maritimes (Stratmann & Boll, 2016).

2.2 Méthode d'analyse des rapports d'accidents

2.2.1 La base de données EPICEA

Les rapports d'accidents ont été extraits de la base de données EPICEA. Il s'agit d'une base de données nationale française anonyme fournie par l'Institut français de recherche et de sécurité. Bien que cette base ne soit pas exhaustive, environ 21 000 cas d'accidents du travail ont été enregistrés depuis 1990 dans les entreprises françaises. Les accidents enregistrés sont étiquetés selon différents niveaux de conséquences, qui peuvent être mortelles, graves (e.g. l'opérateur a été blessé) ou significatives (e.g. certains équipements de travail ont été endommagés). L'objectif de la base de données EPICEA est de mettre en évidence les causes potentielles et l'évolution des accidents, sans chercher à établir les responsabilités, et de fournir des cas illustratifs pour la sensibilisation, la formation, etc.

2.2.2 Méthode d'analyse des rapports

Tous les rapports d'accident de la base de données sont labellisés avec des mots-clés. Afin de se concentrer sur les accidents impliquant des robots, il a été décidé d'utiliser le mot-clé **robot**. Ce mot-clé a permis de collecter 55 rapports d'accident à la date du 20 juin 2020 (63 à la date du 22 janvier 2024). D'autres mots-clés ont été essayés (« robotique » par exemple) mais n'ont donné aucun résultat. Tous les rapports ont été examinés par trois évaluateurs et leur résultats ont été rassemblés et discutés au terme des analyses de chacun. Les évaluateurs étaient d'accord pour 12 des 55 accidents. Pour les 43 rapports restants, chacun a fait l'objet d'une discussion entre chacun des évaluateurs. Certains rapports d'accident ont été rejetés parce qu'ils ne contenaient pas d'informations suffisantes pour comprendre ce qui s'était réellement passé (N=2). Dans certains cas, il y avait un robot dans l'environnement de l'accident, mais l'incident ne résultait pas directement d'un problème avec le robot ou d'une interaction avec lui (N=8). Par exemple, un robot et une presse se trouvent dans le même espace de travail et le robot n'est pas utilisé. En cas de problème avec la presse, l'opérateur pénètre dans la cellule robotisée et se blesse parce que la presse n'a pas été arrêtée. Ce type d'accident a été rejeté. Cet examen a permis de constituer un ensemble de 45 rapports d'accidents impliquant des systèmes

robotisés.

Pour chacun des 45 rapports d'accident, une analyse de la tâche a été effectuée. Tout d'abord, chaque accident est divisé en phases mettant en évidence la séquence détaillée des événements. Ensuite, en utilisant les démons de la CS comme critère d'évaluation, la manifestation des démons de la CS a été mise en évidence au cours des différentes phases. Chaque démon de la CS soulevé a fait l'objet d'un débat entre les évaluateurs. Au final, les démons de la CS retenus ont été le résultat d'un accord entre les évaluateurs.

2.2.3 Identification des démons

Les démons de la CS n'ayant jamais été utilisés pour analyser les accidents de robotique industrielle, ce paragraphe fournit des éléments complémentaires pour aider à identifier leur présence. Ces éléments constituent des lignes directrices pour leur identification.

- **Le modèle mental errant** : identifié lorsque l'opérateur a, ou semble avoir, utilisé une règle d'inférence erronée pour déterminer l'état du robot et de son environnement.
- **Le syndrome hors de la boucle** : identifié lorsqu'un opérateur a manqué un événement important ou qu'une action normale mais inattendue du robot est observée.
- **La tunnélisation attentionnelle** : identifiée lorsque l'opérateur est concentré sur sa tâche lorsqu'il se trouve dans l'espace de travail du robot, quelles que soient les actions de ce dernier.
- **La saillance inappropriée** : identifiée lorsqu'un élément de l'interface n'indique pas clairement les informations pertinentes à l'opérateur, ou peut être confondu par erreur avec un autre.
- **La charge de travail, l'anxiété, la fatigue et autres facteurs de stress (WAFOS)** : identifié lorsque le rapport d'accident mentionne des informations sur l'état psychologique ou cognitif de l'opérateur.
- **La complexité** : identifiée lorsqu'il y a trop de procédures pour l'utilisation ou la maintenance du robot ou lorsque le système ou l'interface est trop complexe pour l'opérateur.
- **La surcharge de données** : identifiée lorsque l'environnement, le robot ou le panneau de commande fournissent trop d'informations par rapport aux capacités de traitement de l'information de l'opérateur.
- **Le piège de mémoire requise** : identifié lorsqu'il est explicitement précisé que l'opérateur oublie une étape importante de la séquence de tâches.

Ces éléments nous ont permis de relever la présence ou l'absence de chacun des 8 démons de la CS pour chacun des 45 accidents robotiques. Plusieurs démons peuvent être identifiés dans un même rapport d'accident. Différentes relations existent entre eux. Il peut s'agir d'une séquence temporelle, d'un lien de causalité ou d'une simple co-occurrence. Parfois, le même ensemble de démons avec la même relation est identifié dans plusieurs rapports d'accident. Cette particularité sera examinée plus tard dans ce chapitre. Enfin, si le même démon de la CS est identifié pour différentes phases de l'accident, il n'est pris en compte qu'une seule fois à des fins statistiques.

2.2.4 Exemple d'analyse d'un rapport

Description d'un des accidents : « *La victime, un opérateur de presse âgé de 27 ans, se trouvait dans l'atelier de la machine de moulage par injection. Pendant qu'il travaillait, il s'est levé pour aller chercher des pièces de l'autre côté du convoyeur. Pour ce faire, elle*

a dû se déplacer dans la zone du robot manipulateur d'évacuation. À ce moment-là, le robot qui effectuait sa descente a heurté la victime près de l'omoplate. Le choc a provoqué diverses contusions nécessitant une hospitalisation. »

2.2.4.1 Division en phases

Tout d'abord, l'accident a été divisé en différentes phases en fonction de l'ordre chronologique des événements.

- S1.** La victime entre dans l'atelier de la machine de moulage par injection.
- S2.** Elle se déplace dans la zone du robot manipulateur d'évacuation.
- S3.** Elle se lève pour aller chercher des pièces de l'autre côté du convoyeur.
- S4.** Le bras robotisé bouge et blesse la victime.

2.2.4.2 Analyse avec les démons de la conscience de situation

Suite à la décomposition en phases, les démons de la CS ont été associés à chaque phase dans la mesure du possible.

- S1.** Selon les informations disponibles, pas de démon durant cette phase.
- S2.** La victime ne doit pas être présente dans l'espace de travail du robot lorsque celui-ci est allumé. Elle ne respecte pas la procédure de sécurité, car elle a un *modèle mental errant* (une mauvaise interprétation) de la situation.
- S3.** Elle manipule des pièces sans faire attention à la position du robot. Pendant cette phase, la victime semble être dans un état de *tunnélisation attentionnelle*.
- S4.** Enfin, parce qu'elle est dans une situation de tunnel attentionnel, la victime ne perçoit pas que le robot se rapproche dangereusement d'elle. Il s'agit d'une situation *hors de la boucle*.

2.3 Résultats de l'analyse d'accidents

L'analyse d'accidents de la base de données EPICEA nous a permis d'identifier les démons de la CS qui ont participé à la dégradation de la CS des opérateurs et qui ont potentiellement conduits à l'accident lui-même. Nous avons également pu identifier des schémas récurrents d'apparition des démons de la CS, ce qui a permis de catégoriser les accidents.

2.3.1 Les manifestations des démons de la conscience de situation

En ce qui concerne les occurrences des démons de la CS dans les accidents robotiques de la base de données EPICEA, trois résultats principaux peuvent être mis en évidence (voir le tableau 2.1).

Les démons de la CS les plus fréquemment relevés étaient le démon *modèle mental errant* et le démon *hors de la boucle*, avec, respectivement, un taux de 100% (N=45) et 86,67% (N=39) d'apparitions respectivement. Le *modèle mental errant* apparaît dans tous les accidents. Cela se produit lorsque l'opérateur interprète mal la situation et fait ensuite des déductions inappropriées sur l'état de l'environnement, par exemple en pensant que la zone de travail du robot est

Démons de la CS	N	Proportion
Modèle mental errant	45	100%
Hors de la boucle	39	86.67%
Tunnélisation attentionnelle	18	40%
Saillance inappropriée	14	31.11%
WAFOS	1	2.22%
Complexité	0	0%
Surcharge de données	0	0%
Piège de mémoire requise	0	0%

TABLE 2.1 – Occurrences des démons de la CS pour chaque accident de la base de données EPICEA.

sûre alors que le robot est encore allumé. De plus, un opérateur qui entre dans la zone du robot sans savoir qu'il est allumé se trouverait déjà dans une situation *hors de la boucle*. Cette dernière s'est produite lorsque l'opérateur n'était pas préparé au redémarrage de l'activité du robot. En outre, nous rapportons deux autres démons qui apparaissent fréquemment. Les démons de *tunnélisation attentionnelle* et de *saillance inappropriée* apparaissent respectivement dans 40% (N=18) et 31,11% (N=14) des accidents robotiques signalés. Le démon *WAFOS* n'a été identifié que dans un unique accident : le seul où le rapport signale explicitement que l'opérateur était en situation de stress. Enfin, trois démons n'ont jamais été identifiés lors d'accidents robotiques. En effet, nous n'avons relevé aucune manifestation de *complexité*, *surcharge de données* et *piège de mémoire requise*. Cela pourrait être dû au manque de détails dans les rapports ou que l'origine des situations dans lesquelles ces démons peuvent apparaître n'existent pas en robotique industrielle.

2.3.2 Séquences de démons de la conscience de situation dans ces accidents

Nous avons identifiés cinq schémas systématiques d'accidents de robotique industrielle. Chacun de ces schémas consiste en la succession de démons de la CS jusqu'à l'accident. Ces cinq schémas sont représentés dans la figure 2.1 :

- **Le schéma A** apparaît dans 13,33% des cas (N=6). *Exemple* : un opérateur entrant dans la zone du robot alors que le robot est encore en marche et pensant qu'il est en sécurité.
- **Le schéma B** apparaît dans 31,11% des cas (N=14). *Exemple* : un opérateur pénétrant dans la zone du robot alors qu'il est allumé (modèle mental errant) et étant heurté suite à un mouvement brusque du robot (hors de la boucle).
- **Le schéma C** apparaît dans 15,56% des cas (N=7). *Exemple* : un opérateur pénètre dans la zone du robot alors qu'il est allumé (modèle mental errant), il pense l'avoir éteint (saillance inappropriée), et il est heurté suite à un mouvement brusque du robot (hors de la boucle).
- **Le schéma D** apparaît dans 24,44% des cas (N=11). *Exemple* : un opérateur pénètre dans la zone du robot alors qu'il est allumé (modèle mental errant) et est heurté par le robot (hors de la boucle) alors qu'il était concentré sur une tâche particulière (tunnélisation attentionnelle).
- **Le schéma E** apparaît dans 15,56% des cas (N=7). *Exemple* : un opérateur entre dans la zone du robot alors qu'il est allumé (modèle mental errant), il pense l'avoir éteint (saillance inappropriée), et il est heurté par le robot (hors de la boucle) alors qu'il est concentré sur un point particulier. tâche (tunnélisation attentionnelle).

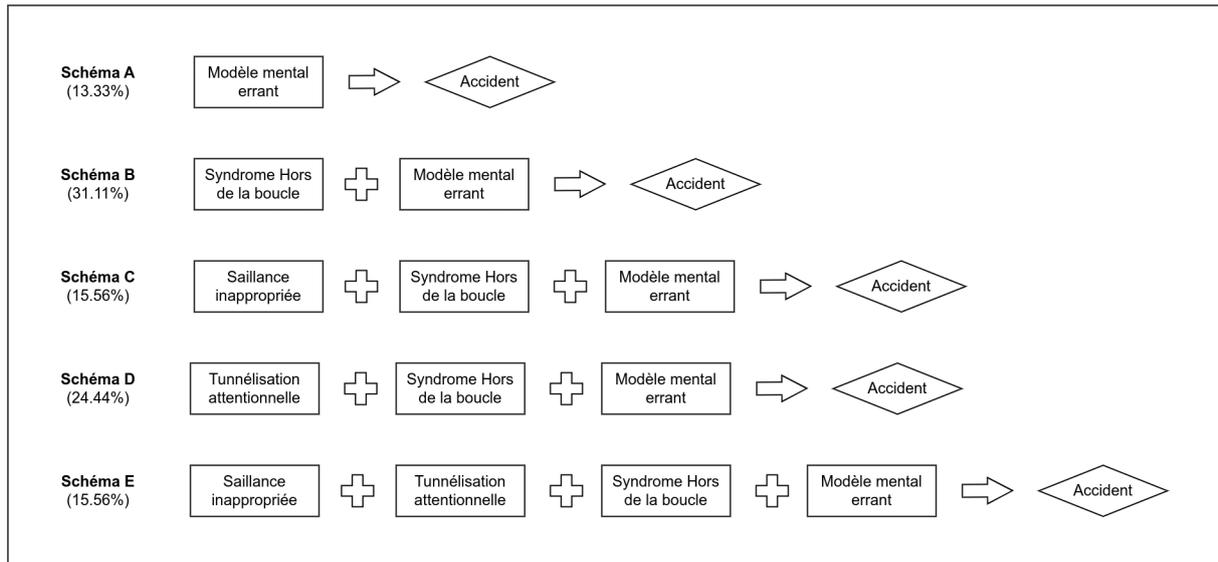


FIGURE 2.1 – Schémas de séquences d'apparition de démons de la CS déduits de l'analyse des accidents.

Nous pouvons observer que *modèle mental errant* se manifeste dans tous les schémas que nous avons trouvés. De plus, il définit à lui seul l'un des schémas qui se produit dans 13,33% du temps. De plus, le démon de la CS *hors de la boucle* apparaît dans tous les autres schémas (86,67% des cas). Finalement nous avons relevé l'apparition des démons de la CS *tunnélisation attentionnelle* et *saillance inappropriée* dans 2 schémas (chacun dans 40% des cas).

2.4 Discussion

L'objectif de ce chapitre était d'identifier les facteurs menant à des accidents de robotique industrielle répertoriés dans la base de données EPICEA de l'INRS. Nous avons fait l'hypothèse que les démons de la CS pouvaient être considérés comme une grille d'analyse des rapports d'accidents. L'analyse des résultats a validée notre hypothèse. Nous avons pu identifier l'occurrence d'au moins un démon dans tous les rapports d'accidents de robotique étudiés.

2.4.1 Démons de la conscience de situation et accidents de robotique industrielle

Nos résultats ont montré que les démons de la CS peuvent être considérés comme des facteurs ayant conduit à un accident. Leur identification a permis d'étiqueter les principales causes d'accidents déjà relevés dans la littérature (Sugimoto & Kawaguchi, 1983; Jiang & Gainer Jr, 1987; Malm et al., 2010). Le *modèle mental errant* est apparu dans tous les accidents analysés. Dans certains cas, il a été relevé lorsque la victime intervenait dans la zone du robot alors qu'il était en fonctionnement, qu'il soit en mouvement ou non. Dans d'autres cas, l'opérateur avait contourné volontairement les mesures de sécurité en se pensant sans danger dans l'espace de travail. Les rapports d'accidents n'étant pas systématiquement détaillés, il était parfois difficile de comprendre le processus décisionnel de l'opérateur. Dans de telles situations, nous avons été obligés de faire des hypothèses basées sur la documentation concernant les raisons qui ont conduit les opérateurs à agir comme ils l'ont fait. Une des raisons d'apparition du démon serait lié à la croyance erronée de l'opérateur selon laquelle « un robot immobile est un robot éteint »

(Sugimoto & Kawaguchi, 1983). Le modèle mental errant serait alors lié à cette fausse croyance de se sentir en sécurité lorsque le robot est inactif.

Le *Syndrome hors de la boucle* était le deuxième démons de la CS le plus fréquent (86,67% des cas) dans notre analyse. Cela correspond à un mouvement, ou une action, du robot non anticipé par la victime. Dans 60% des cas, ce démon est lié avec celui du *modèle mental errant*. Cela peut correspondre à la situation où l'opérateur n'a pas connaissance de l'état actuel du robot et pense qu'il est possible d'entrer dans la zone de travail en toute sécurité (Or et al., 2009). Dans 40% des cas, le robot n'était plus perçu car l'opérateur était fortement concentré sur sa tâche. C'est à ce moment que le démon de la CS *tunnélisation attentionnelle* se manifeste. Cette situation où l'opérateur se concentre sur la résolution d'un autre problème avait déjà été mise en évidence dans la littérature (Malm et al., 2010).

Le démon *saillance inappropriée* est apparu dans 31% des cas. Son apparition est liée au manque d'informations accessibles ou suffisamment marquantes qui pourraient aider l'opérateur à comprendre la situation actuelle. Dans la plupart des cas, ces manifestations résultaient d'un manque ou d'une suppression des mesures de sécurité. Dans d'autres cas, les avertissements du système se sont révélés inadéquats. De telles raisons ont déjà été pointées comme responsables d'accidents (Jiang & Gainer Jr, 1987). L'identification de ce démon souligne également une mauvaise utilisation des moyens de communications dans l'environnement de travail.

Une seule apparition du démon *WAFOS* a été constatée. Les rapports d'accidents ne précisent pas les contraintes que peuvent avoir les opérateurs : il n'y a généralement aucune information sur leur état mental. Ainsi, le *WAFOS* peut avoir été impliqué plus d'une fois parmi les cas de notre analyse. À titre de comparaison, ce démon avait été signalé dans 40% des cas d'accidents maritimes (Stratmann & Boll, 2016). À l'inverse, ils n'ont trouvé aucune manifestation du démon de *saillance inappropriée*. Par ailleurs, plusieurs travaux ont déjà abordé les problématiques de stress ou d'anxiété des opérateurs lors de leurs interactions avec les robots. Les opérateurs ressentent parfois des niveaux élevés de charge cognitive lorsqu'un robot se déplace à proximité d'eux, comme l'a souligné la littérature (Arai et al., 2010). Il a également été démontré que les mouvements rapides ou imprévisibles d'un robot entraînent une augmentation de la charge cognitive ou de l'anxiété (Koppenborg et al., 2017).

Enfin, aucune occurrence des démons de la CS *complexité*, *surcharge de données* et *piège de mémoire requise* n'a été trouvée. Les mêmes résultats pour la *complexité* et le *piège de mémoire requise* ont été relevés dans une analyse des accidents maritimes (Stratmann & Boll, 2016). Encore une fois, ces démons de la CS sont plus difficiles à déduire et dépendent fortement du niveau de détails dans les rapports d'accidents. La *complexité* est considéré comme un démon dit subtil (Endsley, 2016). Il se produit généralement lorsque de nombreuses machines ou fonctionnalités sont impliquées dans le système. Mesurer la complexité d'un système à partir des rapports d'accidents dont nous disposons n'était pas simple. Cela aurait nécessité plus de détails sur la complexité des tâches ou des systèmes dans les rapports. Le *piège de mémoire requise* dépend des capacités de mémoire de l'opérateur et de la façon dont il peut surveiller ses tâches (Endsley, 2016). Cela rend son identification relativement difficile dans un rapport d'accident car cela dépend entièrement de l'opérateur (Chiappe et al., 2012). Comme dans le cas du démon *WAFOS*, l'identification de la *surcharge de données* est directement liée au rapport d'accident et aux informations disponibles. Malheureusement, les rapports ne mentionnent pas la charge cognitive des opérateurs au moment de l'accident.

Concernant les niveaux de CS, les démons identifiés étaient principalement liés au niveau de perception (44,17% des cas) suivi des niveaux de compréhension (28,22%) et de prédiction (27,61%). Toutefois, cette description est statique et ne rend pas compte de l'apparition chronologique des démons de la CS. Puisque la CS est un processus dynamique, il se peut que la perception de la situation par l'opérateur soit initialement correcte puis qu'elle se dégrade dans la suite de la tâche parce qu'il a eu une mauvaise compréhension de la situation ou qu'il a fait une projection erronée sur des événements ultérieurs. Si l'on veut empêcher la manifestation de ces démons, il ne suffit donc pas de corriger le premier niveau, puisqu'une erreur dans le deuxième ou le troisième niveau de CS peut entraîner une erreur ultérieurement dans un niveau précédent.

2.4.2 Schémas d'apparition des démons en robotique industrielle

Cinq schémas systématiques d'apparence de démons de la CS ont été obtenus à la fin de notre analyse des accidents. Plus précisément, le *modèle mental errant* apparaît dans tous ces schémas et survient seul dans 13,33% des accidents. Le démon *hors de la boucle* était présent dans 86,67% des cas. Ce démon de la CS a la particularité de pouvoir apparaître dans deux situations distinctes. D'abord, l'opérateur peut observer que le robot est immobile et penser que celui-ci est arrêté alors qu'il est en attente (*modèle mental errant*). Le fait qu'il confonde un moment d'attente et un arrêt le place hors de la boucle d'action du robot. En outre, on peut considérer que l'opérateur est hors de la boucle s'il est concentré sur sa tâche et ne se rend plus compte que le robot est une source de danger proche. Ce deuxième cas pourrait alors concerner des schémas où apparaît le démon *tunnélisation attentionnelle*. Deux schémas (40% des cas) incluaient les démons de la CS *modèle mental errant*, *hors de la boucle* et *tunnélisation attentionnelle*. Il est ainsi possible que le démon *hors de la boucle* CS se soit manifesté successivement pour le *modèle mental errant* et le *tunnélisation attentionnelle*.

Deux des cinq schémas impliquaient également l'identification du démon de *saillance inappropriée*. Généralement, celui est identifié lorsque les dispositifs de sécurité n'ont pas pu avertir l'opérateur d'un danger dans l'espace de travail ou bien que le message communiqué n'a pas été compris, voir même perçu. Il est alors possible de se questionner à propos d'une réelle différence entre les schémas B et C et les schémas D et E. En effet, tous les rapports d'accidents ne sont pas détaillés de la même manière. Cela laisse à penser qu'il y a peut-être eu, aussi, des problèmes de saillance dans les schémas B et D et qu'ils n'ont tout simplement pas été rapportés.

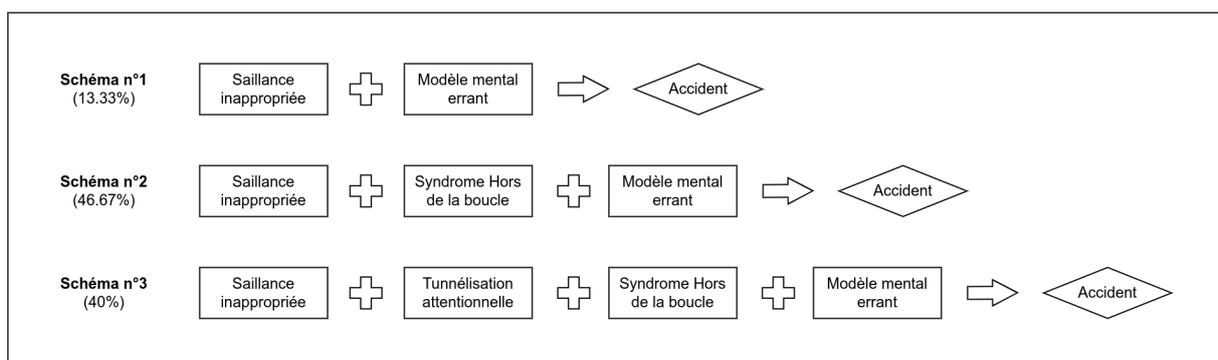


FIGURE 2.2 – Schémas revus des séquences d'apparition de démons de la CS.

En effet, une communication adéquate, aurait pu empêcher l'opérateur d'entrer ou de rester

dans un état de tunnélisation attentionnelle ou d'être hors de la boucle d'action du robot. De manière similaire, une interface de communication adaptée aurait pu permettre de soutenir le modèle mental de l'opérateur et ainsi éviter l'accident. Tout cela nous amène à revoir les cinq schémas identifiés dans notre analyse et à rassembler les schémas B et C et les schémas D et E afin de ne conserver que trois schémas systématiques d'accidents (voir figure 2.2).

2.4.3 Limites de l'étude

La première limite de l'analyse proposée est le manque d'informations dans les rapports d'accidents disponibles dans la base de données EPICEA. Nous n'avons pas pu identifier d'occurrence des démons *complexité*, *surcharge de données* et *piège de mémoire requise*. En effet, comme il n'y avait pas, ou très peu, d'informations sur les procédures et l'état mental des opérateurs, il a été très difficile de déterminer leurs possibles implications dans les accidents signalés sans surveillance constante de la CS interne de l'opérateur. Cela rejoint l'exemple du démon *WAFOS* qui n'a été relevé qu'une seule fois dans les 45 accidents.

Une autre limite est liée à la définition même des démons de la CS et donc à leur identification dans chaque phase précédant l'accident. L'identification repose parfois sur des interprétations subjectives et des appréciations personnelles de la situation décrite. La part de subjectivité est néanmoins atténuée par un consensus entre tous les auteurs sur les définitions des démons de la CS et les éléments supplémentaires pour la prise de décision.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé d'analyser des rapports d'accidents de robotique industrielle en utilisant les démons de la conscience de la situation (CS) comme grille de lecture. Cette analyse a mis en évidence qu'un manque de CS des opérateurs était responsable des erreurs menant aux accidents. Nous avons aussi mis en évidence trois schémas systématiques d'accidents. Chacun de ces schémas est caractérisé par la manifestation d'un ou plusieurs démons de la CS, dégradant cette dernière et diminuant ainsi la sécurité des opérateurs jusqu'à ce que l'accident survienne. Ce chapitre nous a permis de répondre à la question 2 :

Question 2

Quels sont les facteurs de risques qui peuvent participer à la dégradation de la conscience de situation d'un opérateur en milieu industriel ?

Un point important des schémas d'accidents exposés concerne le manque de saillance de l'information. En effet, nous pensons que la principale raison du manque de CS des opérateurs et l'apparition des démons de la CS est dû à une mauvaise utilisation des moyens de communication dans l'environnement de travail. Il serait alors bénéfique de renforcer, ou d'ajouter, des systèmes de communication efficaces au sein des espaces de travail de CHR pour assurer la sécurité des opérateurs. Le choix du moyen de communication doit se faire en tenant compte des potentiels risques de dégrader la CS des opérateurs. Aussi, il est important de s'assurer que les méthodes utilisées ne provoquent pas l'apparition de démons de la CS supplémentaires.

Également, il est important de garder à l'esprit que les résultats proviennent d'une analyse d'accidents de robotique industrielle et non pas d'accidents avec des cobots. À l'heure actuelle,

les robots collaboratifs ne sont encore que trop peu utilisés par les industriels. De ce fait, nous ne disposons pas de données en situation réelle, et encore moins d'accidents, avec des cobots. Nous pensons que l'identification des situations dangereuses, et de leurs causes dans la robotique industrielle, pourront être réutilisées afin de prévenir des accidents dans le contexte de la CHR.

Tout cela nous pousse à considérer l'utilisation du robot lui-même en tant qu'entité de communication. Celle-ci pourrait se faire au travers des mouvements du robot et permettrait d'empêcher de provoquer l'apparition des trois schémas d'accidents discutés dans la section 2.4.2. En effet, permettre au robot de communiquer de manière non verbale aurait plusieurs avantages. D'une part, la personne en interaction prêterait attention au robot qui est souvent la source principale de danger dans l'environnement de travail. D'autre part, cette solution ne nécessite pas d'utiliser de matériel supplémentaire destiné à la communication, ce qui rend son implémentation en milieu écologique plus simple et moins onéreuse. Cependant, il est nécessaire de garder à l'esprit qu'un robot collaboratif dans un milieu industriel est avant tout un agent opérant, qui réalise des tâches, et ne doit donc pas être réduit seulement au rôle d'agent communiquant.

Chapitre 3

Le mouvement du robot comme vecteur de communication pour soutenir la conscience de situation

Table des matières

Introduction	54
3.1 Les mouvements d'un robot comme moyen de communication	55
3.1.1 Moyens de communication d'un robot avec un humain	55
3.1.2 Les mouvements de signalisation	57
3.1.2.1 Génération de mouvements de signalisation	58
3.1.2.2 Mouvements de signalisation d'état	59
3.1.2.3 Mouvements de signalisation d'action	60
3.1.3 Objectif et hypothèses	60
3.2 Méthode expérimentale	61
3.2.1 Contexte de l'expérimentation	61
3.2.2 Participants	61
3.2.3 Tâche de découpe du bois simulée	62
3.2.4 Matériel et dispositif expérimental	63
3.2.4.1 Cobot 1 - Mouvement de signalisation d'action	63
3.2.4.2 Cobot 2 - Mouvement de signalisation d'état	64
3.2.5 Déroulement de l'expérimentation	65
3.2.6 Variables indépendantes étudiées	66
3.2.6.1 La modalité du fléchissement	66
3.2.6.2 Résistance générée par le Cobot 1	67
3.2.6.3 Comportements du Cobot 2	68
3.2.7 Variables dépendantes mesurées	68
3.2.8 Hypothèses opérationnelles	69
3.3 Analyse des résultats	69
3.3.1 Effet de la modalité de fléchissement et de la résistance du Cobot 1 sur le temps	70
3.3.1.1 Effet de la modalité de fléchissement sur le temps	70
3.3.1.2 Effet de la résistance sur le temps	71

3.3.1.3	Effet de l'interaction de la modalité et de la résistance sur le temps	71
3.3.2	Effet de la modalité de fléchissement et de la résistance du Cobot 1 sur la force	71
3.3.2.1	Effet de la modalité de fléchissement sur la force	71
3.3.2.2	Effet de la résistance sur la force	72
3.3.2.3	Effet de l'interaction de la modalité et de la résistance sur la force	72
3.3.3	Effet de la modalité de fléchissement sur le questionnaire SART	73
3.3.4	Effet du comportement du Cobot 2 sur la distance de passage	74
3.4	Discussion	75
3.4.1	Mouvement d'action et maintien dans la boucle d'action du robot	75
3.4.2	Mouvement d'état et soutien au modèle mental de l'individu	75
3.4.3	Saillance des mouvements de signalisation	76
3.4.4	Limites	77
	Conclusion	78

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté une analyse de rapports d'accidents de robotique industrielle en utilisant les démons de la conscience de la situation (CS) comme grille de lecture. Cette analyse a mis en évidence qu'un manque de CS des opérateurs était responsable des erreurs menant aux accidents. Nous avons aussi mis en évidence trois schémas systématiques d'accidents. Chacun de ces schémas est caractérisé par la manifestation d'un ou plusieurs démons de la CS, dégradant cette dernière et diminuant ainsi la sécurité des opérateurs jusqu'à ce que l'accident survienne. Enfin, les recommandations proposées à la fin du chapitre 2 nous poussent à considérer l'utilisation du robot lui-même en tant qu'entité de communication. Ainsi, permettre au robot de communiquer de manière non verbale aurait plusieurs bénéfices. D'une part, la personne en interaction prêterait attention au robot qui est souvent la source principale de danger dans l'environnement de travail. D'autre part, cette solution ne nécessite pas d'utiliser de matériel supplémentaire destiné à la communication, ce qui rend son implémentation en milieu écologique plus simple et moins onéreuse.

Dans ce chapitre, nous introduisons le concept de mouvement de signalisation. Ces derniers sont un moyen de communication non-verbale dont les robots peuvent être dotés afin de soutenir les interactions avec un humain. Ils sont un moyen de renforcer la transparence d'un robot pour les individus qui partagent son espace de travail. Un point fort de notre contribution réside dans le fait que les robots peuvent à la fois réaliser des tâches et communiquer grâce à la redondance de leurs articulations. Nous pensons qu'utiliser le robot comme vecteur de communication est une solution prometteuse pour améliorer la performance et la sécurité des opérateurs en milieu industriel dans des scénarios de collaboration humain-robot (CHR). Les mouvements de signalisation se déclinent en deux types : les mouvements dits *d'action*, liés à la tâche du robot, et les mouvements dits *d'état*, liés aux états du robot. Nous souhaitons, dans ce chapitre, vérifier si la lisibilité de ces mouvements permet effectivement de soutenir la CS d'humains en interaction avec un robot collaboratif. Plus précisément, nous voulons examiner s'ils permettent d'empêcher les individus de se trouver dans les schémas d'accidents n°1 et 2 (page 50) décrits dans la section 2.4.2 du chapitre 2. Pour rappel, le schéma n°1 comportait l'apparition du démon

de la CS *modèle mental errant* et le schéma n°2 correspondait à la manifestation des démons *syndrome hors de la boucle et modèle mental errant*.

Ce chapitre répond à la question 3 présentée en Introduction de ce manuscrit.

Question 3

La communication d'un robot à l'aide de ses mouvements permet-elle d'améliorer la conscience de situation d'un humain avec qui il interagit ?

Nous débutons ce chapitre en présentant une courte revue de la littérature qui nous a menée à notre question de recherche en section 3.1. Nous discuterons des différents moyens de communications auxquels ont accès les robots collaboratifs et présenterons en détails les mouvements de signalisation et la manière dont un robot peut les générer. Nous distinguons deux types de mouvements, les mouvements de signalisation d'action et les mouvements de signalisation d'état. Nous terminons cette section en présentant nos hypothèses théoriques. Ensuite, en section 3.2, nous détaillons la méthode expérimentale mise en place afin de vérifier nos hypothèses. L'analyse de nos résultats décrite en section 3.3 montre un effet positif des deux types de mouvement de signalisation sur la CS des participants dans un scénario de CHR. Nous discutons des résultats obtenus en section 3.4 et concluons ce chapitre en rappelant les contributions de ce travail et les perspectives qu'il propose.

3.1 Les mouvements d'un robot comme moyen de communication

3.1.1 Moyens de communication d'un robot avec un humain

Parmi les différents canaux de communication accessibles aux robots, les plus couramment utilisés sont les signaux visuels (textuels ou lumineux) et sonores (Bonarini, 2020) en interaction humain-robot (IHR). Généralement, ces signaux sont produits par le biais d'interfaces additionnelles intégrées dans l'espace de travail des robots (Villani et al., 2018). Bien que ces dernières puissent contribuer à maintenir un niveau élevé de CS, elles augmentent aussi le risque de précipiter l'opérateur dans des conditions où sa CS est dégradée (Endsley, 2016). En effet, comme nous l'avons vu dans le chapitre 2, le robot est généralement la source de danger principale de l'environnement de travail. Ainsi, le fait de détourner l'attention de l'humain du robot vers une interface externe, souvent un écran, peut le plonger dans des situations de tunnélisation attentionnelle ou d'hors de la boucle. Il a également été suggéré d'utiliser des signaux d'alarme sonores (Satuf et al., 2016). Néanmoins, l'utilisation des alarmes peut être entravée par le bruit ambiant dans les environnements industriels et peut également nuire à la CS (Endsley, 2018). Utiliser des alarmes sonores nécessite que l'opérateur soit convenablement formé à comprendre leur signification et leur degré d'importance.

Une autre piste explorée dans la littérature concerne l'utilisation des mouvements et d'indices sociaux des robots en tant que moyen de communication non-verbale (Breazeal et al., 2005; Dragan et al., 2013; Hoffman & Ju, 2014; Dragan et al., 2015; Terzioğlu et al., 2020). Selon Berthoz, le mouvement peut être considéré comme un sens à part entière, défini à la fois comme un objet d'action et de perception (Berthoz, 1997). D'après sa théorie, le mouvement doit être vu comme une boucle fermée rétroactive, qui s'ajuste au cours du temps en fonction

de la perception. L'humain est capable de déduire de nombreuses caractéristiques physiques ou cognitives simplement en percevant des mouvements (Colombel, 2022) : l'identité d'une personne (Cutting & Kozlowski, 1977; Westhoff & Troje, 2007), son genre (Troje, 2002; Mather & Murdoch, 1994), des émotions (Dittrich et al., 1996; Parkinson et al., 2017) ou l'état de santé d'un individu (Sundelin et al., 2015; Kramer et al., 2010).

Cette capacité de distinction ne se limite pas à la perception de mouvements humains mais s'applique aussi pour les mouvements de robots. Il a été montré que des observateurs humains sont capables de reconnaître des gestes d'hésitation d'un robot dans des scénarios de CHR (Moon et al., 2011). Les mouvements d'un robot pourraient être un moyen d'indiquer aux utilisateurs les actions et les interactions possibles (Hoffman & Ju, 2014). Ces indices sont appelés « affordances » (Norman, 1999) et font référence aux possibilités d'action facilement perceptibles par un acteur. Dans l'interaction, les êtres humains utilisent la kinésique pour communiquer des informations, raisonner sur les états mentaux, accompagner le discours, exprimer des émotions et des attitudes, etc. (Argyle, 2013; Ekman & Friesen, 1969). La kinésique se définit comme « *la génération et l'interprétation du comportement non verbal exprimé par le mouvement du corps* » (Hans & Hans, 2015). Les mouvements et les gestes sont importants pour la coordination et la réalisation d'activités communes, où ils servent à communiquer des intentions et à se référer à des objets communs (Clark, 2005). Il existe un nombre important de travaux concernant l'analyse des indices non verbaux et des perceptions qui en résultent (Knapp et al., 2013; Moore et al., 2010).

Il a été suggéré que les personnes lisent et interprètent les signaux non verbaux d'un robot afin de coordonner leur comportement de manière à améliorer l'efficacité et la robustesse du travail d'équipe (Breazeal et al., 2005). Cependant, ces travaux concernent des interactions avec robots dits sociaux et donc d'aspect et d'utilité différents des robots en milieu industriel. Contrairement à leurs homologues industriels, les robots sociaux sont souvent anthropomorphe ou zoomorphe (Breazeal et al., 2016) ce qui peut faciliter la génération de mouvements de communications et d'indices sociaux, par exemple le regard.

L'efficacité de l'utilisation d'indices sociaux et de communication par le mouvement avec un cobot ont été étudiées du point de vue de l'interaction sociale (Terzioğlu et al., 2020). Les chercheurs soulignent que les indices sociaux ayant des bases biologiques et éthologiques, tels que les regards et les mouvements de respiration, contribuent de manière pertinente à communiquer les états internes et les intentions d'un robot. Bien que les résultats de ces travaux de recherche démontrent la pertinence de ces méthodes de communication pour le côté hédonique de l'interaction, ils n'abordent pas explicitement des notions de sécurité, de performance ou de compréhension de l'intention du robot. Aussi, le robot collaboratif est ici considéré seulement comme un agent social et non plus comme un agent opérant dans l'environnement de travail.

Aussi, il a été montré que les mouvements d'un robot peuvent faciliter la coordination jointe avec un humain et aider sa compréhension des objectifs du robot (Dragan et al., 2013). Les auteurs soutiennent qu'il serait bénéfique de soutenir la lisibilité du mouvement plutôt que sa fonctionnalité ou sa prédictibilité (voir fig 3.1). La lisibilité du mouvement est caractérisée par le fait qu'elle permette à l'observateur de prédire l'objectif ou l'intention exprimée par le mouvement. A l'inverse, la prédictibilité du mouvement est relative à sa similitude avec le mouvement attendu par l'observateur pour un objectif donné. Ces travaux soulignent que les humains en interaction avec un robot tirent des informations sur les objectifs et les actions d'un robot selon la manière dont il se déplace dans l'environnement de travail (Dragan et al., 2015). Ces travaux traitent principalement de la perception du mouvement par l'humain plus que de la

communication explicite du robot vers l'humain.

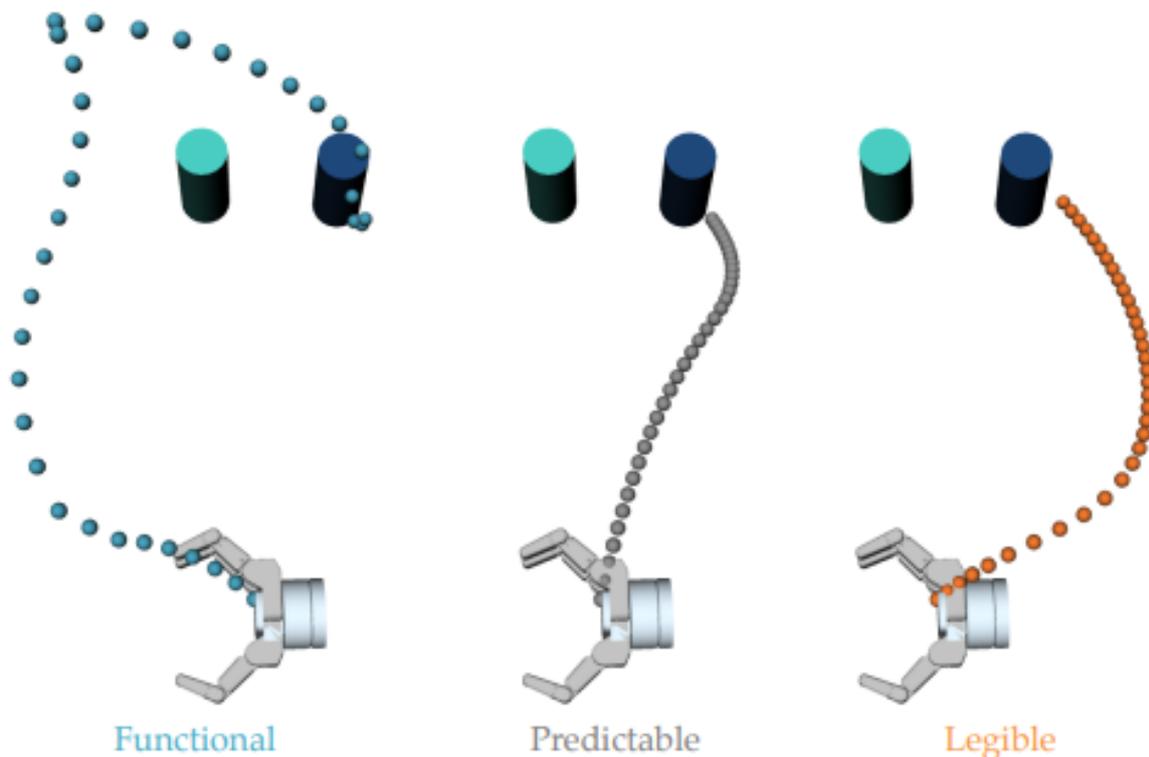


FIGURE 3.1 – Mouvements fonctionnel, prévisible et lisible, tiré de Dragan et al. (2013)

Ces derniers travaux (Terzioğlu et al., 2020; Dragan et al., 2013, 2015) ouvrent la perspective d'utilisation des mouvements d'un robot industriel pour communiquer avec des partenaires humains dans la robotique industrielle et la collaboration humain-robot (CHR). De plus, il n'existe pas, à notre connaissance, de travaux montrant un effet bénéfique de mouvements de communication non-verbale de robots sur la conscience de la situation (CS) d'humains en interaction. Néanmoins, il est important de garder à l'esprit que de nombreuses contraintes, notamment de sécurité et de productivité, restreignent cette voie de communication potentielle.

3.1.2 Les mouvements de signalisation

En vue d'être en adéquation avec les différentes contraintes inhérentes au milieu industriel, nous proposons d'utiliser le robot en tant que moyen de communication non-verbale, et plus particulièrement, ses mouvements. Ces mouvements de communication, appelés mouvement de signalisation, sont un moyen de donner accès à des informations intangibles importantes ou de renforcer les informations déjà fournies sans surcharger les canaux de communication existants. Cela permet, d'une part, de s'assurer que l'attention de la personne est concentrée vers le robot et, d'autre part, de diminuer le nombre de sources de distractions potentielles dans l'environnement de travail. La finalité attendue de cette méthode de communication est de renforcer la conscience de la situation (CS) des personnes qui partagent leur environnement de travail avec un robot.

Ces mouvements sont superposés aux mouvements générés pour réaliser la tâche principale du robot. Ainsi, ils n'entravent pas cette dernière et permettent au robot de conserver son rôle d'agent opérant en plus d'être un agent de communication. En effet, il est fondamental que la

communication ne se fasse pas au détriment des tâches en cours mais plutôt qu'elle se superpose à celles-ci pour donner des informations aux partenaires humains.

3.1.2.1 Génération de mouvements de signalisation

Les mouvements de signalisation sont générés grâce à la redondance des robots collaboratifs (Siciliano & Slotine, 1991; Mansard et al., 2009). On parle de redondance lorsqu'un manipulateur robotique possède plus de degrés de liberté que ceux strictement nécessaires à l'exécution d'une tâche donnée (Chiaverini, 2021). Lorsqu'une trajectoire est décrite dans l'espace Cartésien, un robot n'a besoin d'au maximum que de six degrés de liberté pour déplacer son effecteur. Ainsi un robot doté de sept degrés de liberté (voir figure 3.2), sera intrinsèquement redondant par rapport à cette tâche. On pourra noter qu'à l'atteinte d'une singularité, à savoir la perte d'un degré de liberté due à sa configuration articulaire, ce dernier perdra sa propriété de redondance. Par ailleurs, même les bras robotisés ayant moins de degrés de liberté, comme les manipulateurs industriels conventionnels à six articulations, peuvent devenir redondants pour des tâches spécifiques, telles que le positionnement de l'effecteur final sans contrainte sur l'orientation. Souvent, la redondance d'un robot par rapport à sa tâche est utilisé à des fins de précisions, d'évitement d'obstacles ou de résolution de contraintes (articulaire, de vitesse ou d'accélération) (Flacco et al., 2012).

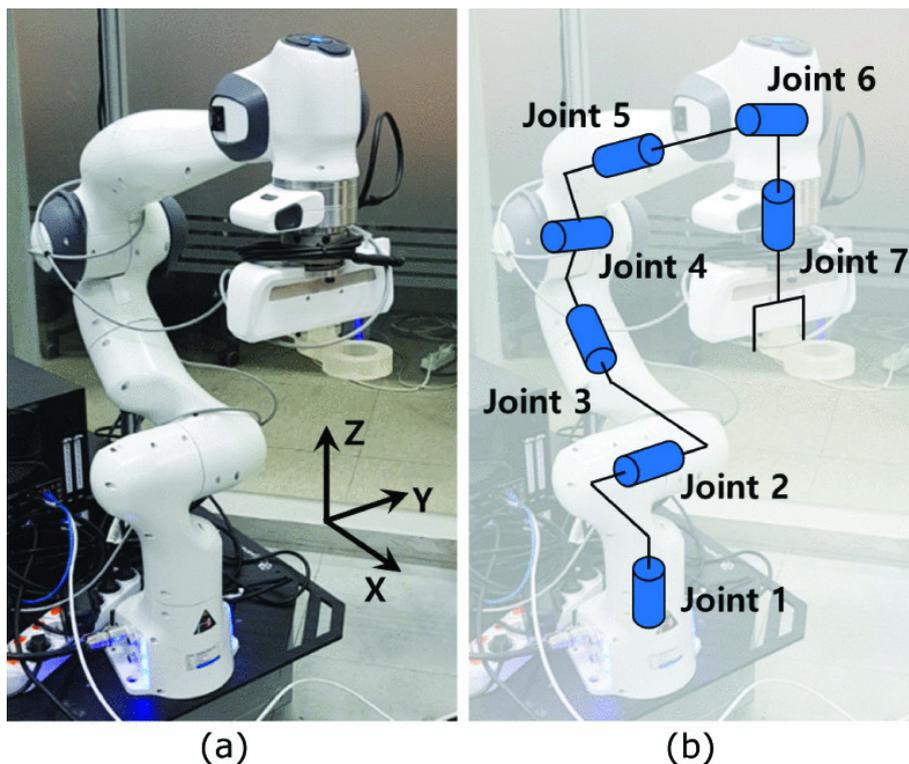


FIGURE 3.2 – Robot Panda de Franka Emika et sa configuration articulaire à 7 degrés de liberté ; tiré de (Lee & Park, 2021).

La présence de degrés de liberté supplémentaires en plus de ceux strictement nécessaires à l'exécution de la tâche permet au manipulateur d'effectuer des mouvements qui ne déplacent pas l'effecteur final (voir figure 3.3). Cela implique que la même tâche au niveau de l'effecteur final peut être exécutée de plusieurs manières au niveau de l'articulation. Ainsi, grâce à se(s) degré(s) de liberté supplémentaire(s), le robot peut effectuer une même tâche dans des configurations

articulaire différentes (Yoshikawa, 1985; Salini et al., 2011; Escande et al., 2014; Joseph et al., 2019).

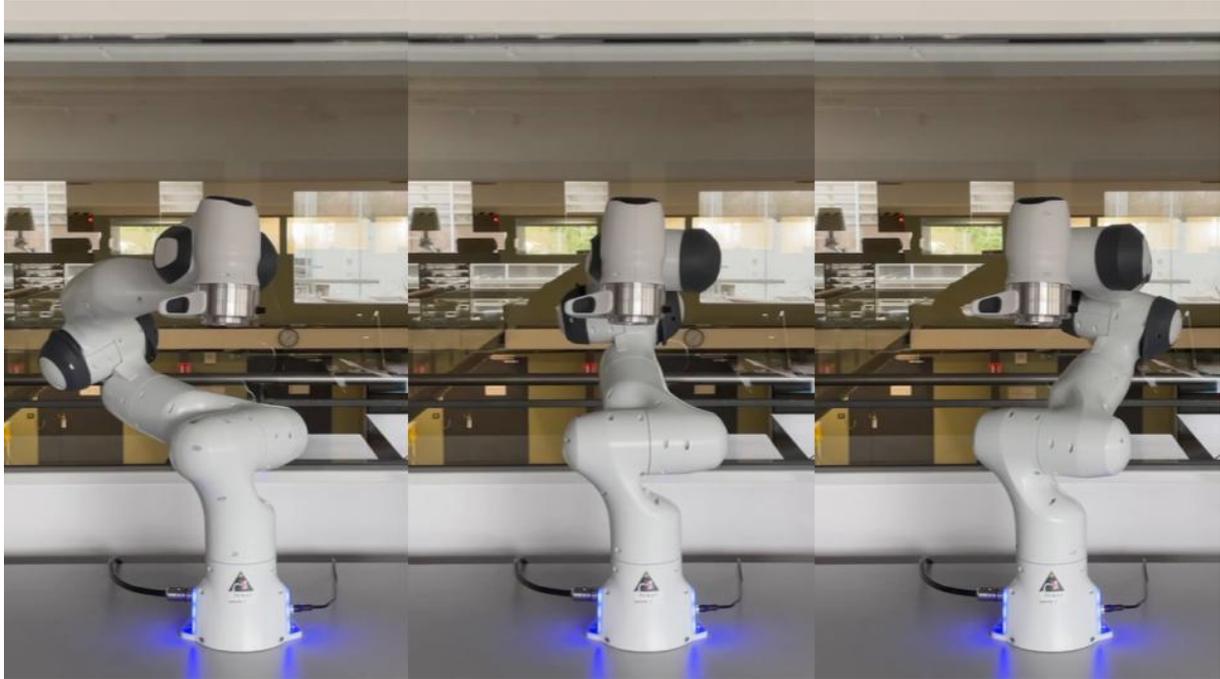


FIGURE 3.3 – Redondance du robot Panda de Franka Emika. Ici, le robot est en compensation de gravité à un point donné dans l'espace (tâche principale). Les trois images montrent trois configurations différentes de compensation de gravité en ce même point de l'espace.

Pour générer les mouvement de signalisation, nous proposons d'utiliser le principe de la redondance articulaire du robot afin de superposer des mouvements de communication à la tâche principale du robot. De cette façon, le robot peut être à la fois un agent opérant, qui réalise une tâche, et un agent de communication, qui interagit avec ses partenaires humains.

Du point de vue de la conscience de la situation (CS), nous considérons les mouvements de signalisation comme un solution saillante de de protéger les opérateurs de situations de *modèle mental errant* et d'*hors de la boucle* d'activité du robot. Nous distinguons deux types de mouvements pour soutenir la CS des personnes : les mouvements de signalisation **d'état** et les mouvements de signalisation **d'action**.

3.1.2.2 Mouvements de signalisation d'état

Ces mouvements informent les opérateurs de l'état du robot. Ils sont indépendants des applications et des tâches du robot. Ils servent notamment à éviter les confusions que les opérateurs pourraient avoir quant à l'état de fonctionnement du robot. Le mouvement choisi doit être suffisamment explicite et universel pour éviter toute ambiguïté quel que soit le niveau d'expertise des utilisateurs. Par exemple, la respiration est un mouvement qui peut permettre de signifier à une personne que le robot est actif, même s'il ne réalise pas de tâche à l'instant présent. Il permet notamment d'éviter la croyance erronée qu'un robot inactif est un robot éteint. En percevant ce mouvement, nous nous attendons à directement influencer la compréhension des personnes vis-à-vis de l'état du robot.

Les mouvements de respirations sont considérés comme des mouvements anthropomorphe ou bio-inspirés (De Visser et al., 2016; Duffy, 2003; Hoffman & Ju, 2014; Natarajan &

Gombolay, 2020), et ont, par le passé, déjà été étudié dans la littérature. D’abord avec le robot social Nao (Asselborn et al., 2017; Cuijpers & Knops, 2015) et plus récemment avec le robot collaboratif UR3 (Terzioğlu et al., 2020). Néanmoins, dans ces travaux, les effets du mouvement ne sont analysés qu’en fonction du niveau d’acceptation sociale et non pas des bénéfices apportés à la sécurité, la performance ou la CS.

3.1.2.3 Mouvements de signalisation d’action

Ces mouvements permettent au robot de communiquer à propos de la tâche qu’il est en train d’effectuer. Ils permettent à l’opérateur d’être informé de l’état de la tâche et de ce qu’est en train de faire le robot. Ils visent à maintenir l’implication de l’humain dans la tâche et de l’aider à prendre des décisions sur les actions qu’il a à réaliser. Le but ici est de rendre le robot transparent vis-à-vis de ses partenaires humains. En percevant ce mouvement, nous nous attendons à directement influencer la compréhension et la projection de la prochaine tâche du robot.

Au niveau cognitif, la transparence fait partie des principes de conception orientés vers la CS (Chen et al., 2018a; Endsley, 2016). Pour un robot, elle peut être définie comme l’observabilité (*que fait le robot ?*), la compréhensibilité (*pourquoi fait-il cela ?*) et la prévisibilité (*qu’est-ce qu’il fera ensuite ?*) de son comportement (Alonso & De La Puente, 2018). D’après la littérature, elle est considérée comme un moyen de parvenir à une CS partagée et à des intentions mutuelles entre des humains et un système (Endsley, 2017).

3.1.3 Objectif et hypothèses

Pour répondre à la question 3, nous proposons l’hypothèse suivante à partir de la littérature et du chapitre précédent :

Hypothèse 3.1

Les mouvements de signalisation du robot améliorent la conscience de situation de la personne qui interagit avec le cobot.

Cette hypothèse sera par la suite déclinée en deux sous-hypothèses s’intéressant chacune à un des deux types de mouvement de signalisation, à savoir d’état ou d’action.

Hypothèse 3.1.1

Les mouvements de signalisation d’état du robot améliorent la conscience de situation de la personne qui interagit avec le cobot.

Il s’agit de vérifier si le fait qu’un robot génère des mouvements de respiration (Asselborn et al., 2017; Cuijpers & Knops, 2015; Terzioğlu et al., 2020) pour témoigner de son activité permet d’améliorer la sécurité des personnes en améliorant leur CS. Ici, il est question de soutenir le modèle mental de l’humain afin de l’éloigner de conditions accidentogènes comme vue dans le 2.

Hypothèse 3.1.2

Les mouvements de signalisation d'action du robot améliorent la conscience de situation de la personne qui interagit avec le cobot.

Il s'agit d'étudier le lien entre transparence et CS (Endsley, 2016, 2017; Alonso & De La Puente, 2018; Chen et al., 2018a). Notamment, nous souhaitons vérifier que ces mouvements permettent de ré-introduire l'humain dans la boucle d'action d'un robot. Dans ce cas, nous souhaitons empêcher l'humain de se retrouver dans des conditions de CS dégradée comme vue dans le 2.

3.2 Méthode expérimentale

3.2.1 Contexte de l'expérimentation

Cette expérimentation a été conçue à l'aide du dispositif expérimental utilisé dans le cadre des travaux de recherches de N. Benhabib, et valorisé dans Benhabib et al. (2021). Le but de ce dispositif expérimental était de proposer une évaluation de l'expertise manuelle sur la base de trois critères d'évaluation : la sécurité, l'inconfort et la performance. Les critères étaient évalués à l'aide d'une maquette physiquement réaliste d'une tâche de découpe de bois. Cette dernière est connue pour la vigilance qu'elle implique vis-à-vis de sa propre sécurité dans le domaine de la menuiserie. Cette maquette comprend un robot collaboratif à 7 degrés de liberté utilisé à la fois pour simuler les outils de coupe et pour mesurer le mouvement de la pièce de bois. La tâche nécessite un effort conjoint entre l'humain et le cobot pour pousser une planche de bois le long d'un rail.

Sur la base de ce dispositif expérimental, nous avons ré-imaginé la procédure et les tâches réalisées par les humains et le robot dans le but d'évaluer l'effet de nos deux types de mouvement de signalisation sur la CS des participants. Le robot qui, initialement, simulait les outils de coupe, peut maintenant aussi générer des mouvements de signalisation d'action en lien avec sa tâche.

Nous avons également ajouté un deuxième robot collaboratif dans la salle expérimentale. Celui-ci ne réalise pas de tâche avec l'humain mais partage seulement son environnement de travail. Ce robot génère des mouvements de signalisation d'état, plus précisément de respiration.

3.2.2 Participants

Nous avons recruté 17 participants pour notre expérimentation sur un campus universitaire grâce à des listes de mails universitaire et des réseaux sociaux. Ils ont dû s'inscrire au préalable sur un outil de planification d'événements. Ils étaient âgés de 20 à 32 ans ($M = 23.06$, $SD = 2.91$) et n'étaient pas familiers avec la tâche. Un participant a été écarté en raison de problèmes techniques et matériels survenus au cours de l'expérience. Les résultats ont été analysés sur les 16 participants restants. En outre, deux pannes de capteur ont entraîné des données manquantes pour 2 essais de 2 participants (2 données sur 90 pour une variable mesurée dans le premier cas, 2 données sur 21 pour une variable mesurée dans le second cas). Étant donné le nombre limité de données manquantes, nous avons choisi de conserver ces deux participants et d'adapter en conséquence l'analyse des données afin que la différence ne soit pas gênante. L'expérience

a été réalisée avec l'accord d'un comité d'éthique (COERLE¹, autorisation n°2021-02). Tous les participants ont rempli un formulaire de consentement pour prendre part à l'expérience et utiliser leurs données pour l'analyse de ce travail.

3.2.3 Tâche de découpe du bois simulée

Les participants devaient participer à une tâche de simulation de découpe de bois. Il leur était demandé de pousser une planche de bois sur une table de travail le long d'un rail à vitesse constante, en tenant des poignées placées à l'extrémité de la planche (voir figure 3.4).

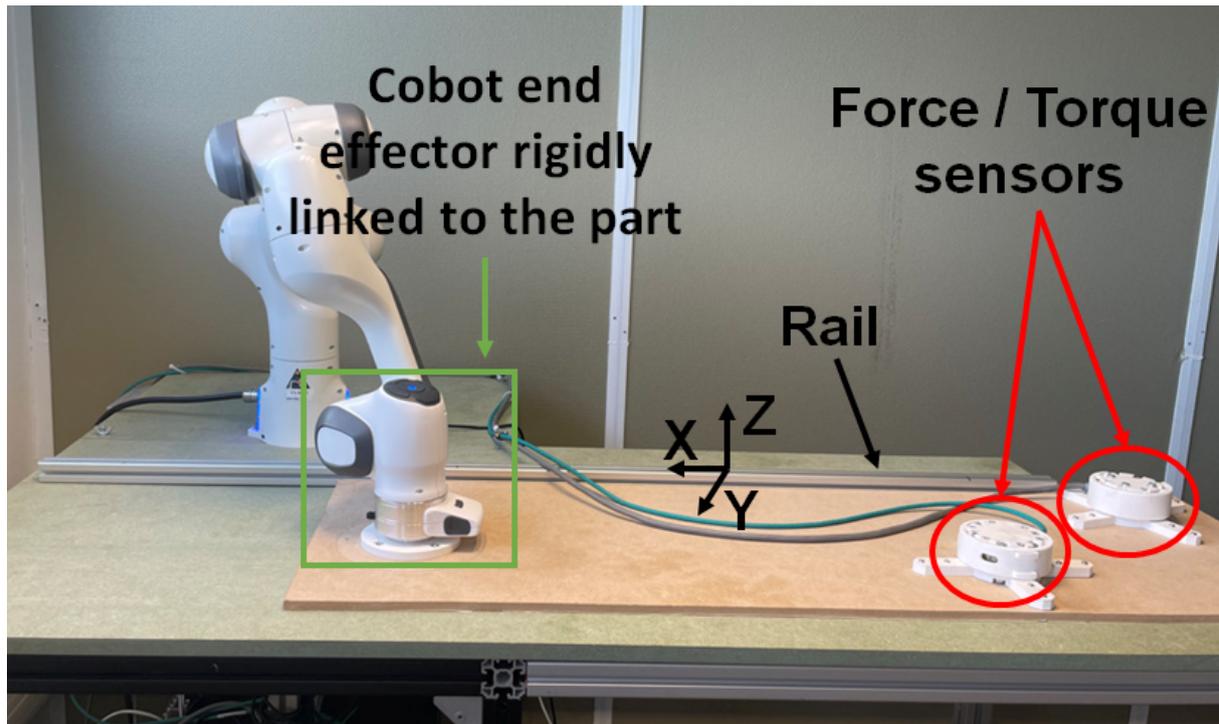


FIGURE 3.4 – Dispositif expérimental pour simuler une tâche de découpe de bois en menuiserie à l'aide d'une maquette physiquement réaliste. La pièce de bois est poussée par des poignées incorporant des capteurs de force/couples à 6 axes. Un robot collaboratif à 7 degrés de liberté (Panda de Franka Emika) est attaché à la pièce de bois et reproduit les forces de coupe basées sur un modèle de coupe de bois.

La planche est connectée à un robot collaboratif qui reproduit par simulation les efforts de coupes générés par trois types de bois différents (Benhabib et al., 2020). Autrement dit, le robot applique trois résistances différentes en poussant contre la direction du mouvement du participant. On suppose que plus la planche de bois est dense, plus la résistance à la découpe est importante. Les trois résistances pour le bois sont fixées à 30.41N (30N sur l'axe x et 5N sur l'axe y), 46.10N (45N sur l'axe x et 10N sur l'axe y) et 61.85N (60N sur l'axe x et 15N sur l'axe y). Ces trois résistances sont respectivement désignées par les termes suivants : **Faible**, **Moyenne** et **Haute**.

La tâche est séparée en trois phases, chacune composée de trente essais. Chaque essai est associé aléatoirement (de manière contrôlée) à une des trois résistances, produite par le cobot. Un essai commence lorsque le participant commence à pousser la planche au delà d'une limite marquée sur le rail et se termine lorsqu'il retire la planche derrière cette même limite.

1. <https://www.inria.fr/fr/comite-operationnel-devaluation-des-risques-legaux-et-et-hiques>

3.2.4 Matériel et dispositif expérimental

La maquette décrite dans la fig 3.4 reproduit le processus d'une tâche de découpe du bois, où un robot collaboratif (Panda de Franka Emika¹), appelé *Cobot 1*, à 7 degrés de liberté simule les efforts de coupe appliqués par la machine-outil sur la pièce de bois conformément au modèle développé dans (Porankiewicz et al., 2007) et à la mise en œuvre proposée dans (Benhabib et al., 2020, 2021).

Un second robot Panda, appelé *Cobot 2*, est placé dans la salle d'expérimentation pour simuler un environnement de travail industriel. Plus précisément, il est placé sur le chemin menant à un ordinateur utilisé pour répondre aux questionnaires au cours de l'expérimentation. Un capteur de distance laser 2D était installé sous le Cobot 2.

Le questionnaire utilisé est le Situation Awareness Rating Technique (SART) (Taylor, 2017) qui évalue la CS de manière subjective et est rempli après chaque phase de l'expérimentation (voir annexe A). Il est composé de 10 questions qui évaluent trois dimensions de processus cognitif impliqué dans la tâche : la demande attentionnelle, la réserve attentionnelle et la compréhension. Chaque question est évaluée à l'aide d'une échelle de Likert à sept niveaux de précision, et un score global d'CS est ensuite calculé. En plus de ce questionnaire, les participants doivent régulièrement aller répondre à une question qui les interroge à propos de l'effort physique ressenti après une série d'essais.

Deux ordinateurs sont utilisés pour mettre en place l'expérimentation. Le premier sert à lancer l'expérience, à contrôler le robot, à enregistrer les données mesurées et les enregistrements (logs) du robot. Celui-ci est placé derrière la table de travail et sert de bureau à un des expérimentateurs. Le second ordinateur sert uniquement à recueillir les réponses des participants aux questionnaires.

Pour des raisons techniques et pour mener à bien l'expérience, deux expérimentateurs devaient être présent dans la pièce. Un des expérimentateurs était à un bureau pour surveiller les logs du Cobot 1 et gérer le déroulé de l'expérimentation. Le second expérimentateur était assis derrière la table de travail et le participant afin de surveiller tout risque potentiel pour le participant et le Cobot 2. Enfin, pour des raisons de sécurité, un bouton d'arrêt d'urgence par robot était placé près de chaque expérimentateur.

3.2.4.1 Cobot 1 - Mouvement de signalisation d'action

Le Cobot 1 est chargé de mettre en œuvre les résistances lorsque le participant exécute la tâche. Les trois résistances (Faible, Moyenne, Haute) sont présentées dans un ordre aléatoire contrôlé qui est le même pour les trois phases.

Au-delà de son rôle de simulation de la tâche de découpe de bois, ce robot est également utilisé pour évaluer l'efficacité du mouvement de signalisation d'action. Pour cela, nous proposons de le symboliser comme un mouvement de **fléchissement**. L'idée de ce mouvement de signalisation d'action est qu'il soit associé à la résistance produite par le robot. Plus la résistance est haute, plus le robot sera incliné de manière antagoniste à la personne (voir figure 3.6). Il représente un mouvement antagoniste de résistance à la poussée de l'humain. Métaphoriquement, on pourrait voir ce mouvement postural comme une personne se tenant sur ses appuis afin de résister à la poussée d'un autre individu. Plus l'individu qui résiste est fléchi sur ses appuis, plus

1. <https://robodk.com/robot/Franka/Emika-Panda>

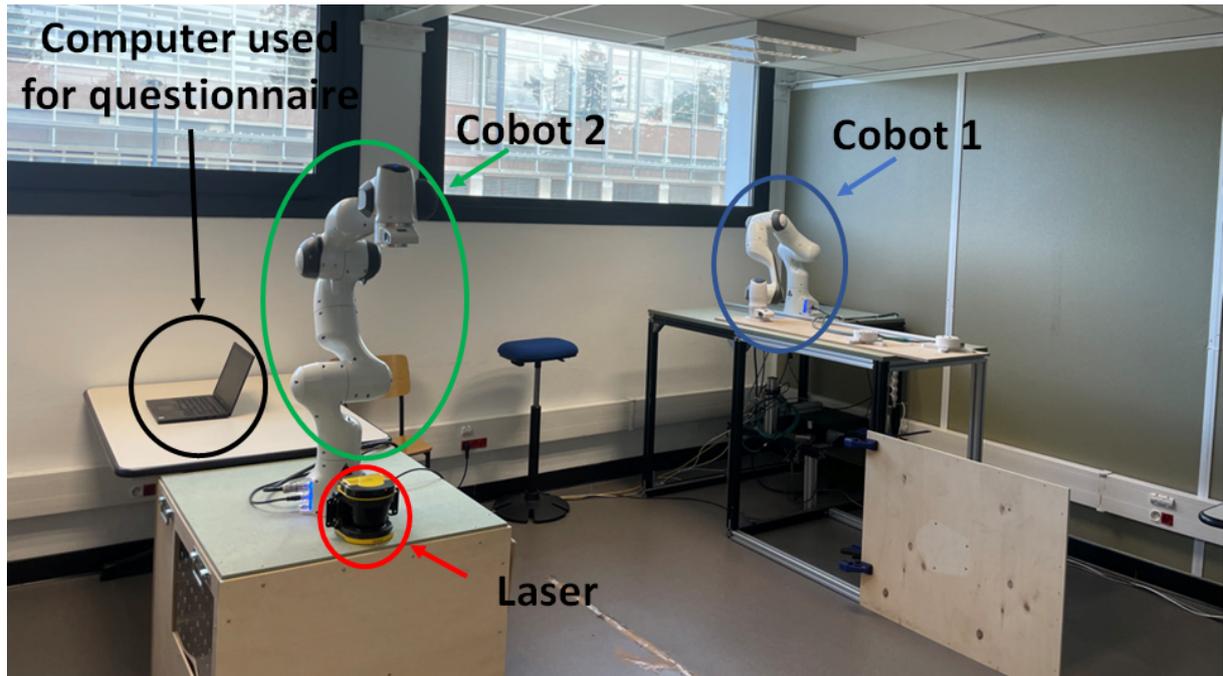


FIGURE 3.5 – Vue de la salle utilisée pour les expériences. Les participants effectuent leurs essais sur le côté gauche du tableau, près de la table de travail du Cobot 1. Pour atteindre l’ordinateur, ils doivent passer devant le Cobot 2.

il résistera à la poussée de son adversaire. Ici, le fléchissement du robot symbolise cet individu qui résiste à la poussée de l’adversaire, à savoir son partenaire humain.

Selon la phase expérimentale, le robot peut, ou non, générer ce mouvement en plus des efforts mobilisés pour exercer la résistance sur la planche. De plus, dans le cas où le mouvement est généré au cours d’une phase, sa signification peut être expliquée, ou non, par l’expérimentateur au participant. Nous distinguons alors trois modalités du mouvement de fléchissement : {OFF, ON Non expliqué, ON Expliqué}.

3.2.4.2 Cobot 2 - Mouvement de signalisation d’état

Le Cobot 2 agit en autonomie dans la salle tout au long de l’expérimentation. Celui-ci est positionné derrière le dispositif de simulation de découpe de bois (voir figure 3.7). Le participant n’est jamais en interaction avec ce robot, ils partagent seulement tous les deux le même environnement, la salle expérimentale, et nous permet d’observer si les participants prêtent attention, ou non, à leur sécurité.

Même s’il n’est pas impliqué dans la tâche de découpe de bois, le comportement des participants à son égard est observé, notamment du point de vue de leur sécurité. Le cobot est positionné de telle sorte que le participant est obligé de passer devant lui pour aller répondre à des questionnaires. Nous considérons qu’un participant qui s’éloigne du robot est plus vigilant vis-à-vis de sa propre sécurité et dispose donc, d’une meilleure CS.

Le Cobot 2 génère le mouvement de respiration, considéré comme un mouvement de signalisation d’état (voir figure 3.8). Il alterne régulièrement entre trois comportements : {**Immobile**, **Actif** et **Respiration**}. Lorsqu’il est **Actif**, le robot effectue des mouvements vers l’avant. Ce comportement est celui mis en œuvre par défaut tout au long de l’expérimentation. Lorsqu’il



FIGURE 3.6 – Mouvement de fléchissement mis en œuvre par le Cobot 1. A gauche le fléchissement pour la résistance Faible, au centre pour la résistance Moyenne et à droite pour la résistance Haute. Plus la résistance est élevée, plus le robot est penché vers la direction opposée à l'individu qui pousse la planche.

est **Immobile**, le robot reste en compensation de gravité en un point précis devant lui. Enfin, lorsqu'il est en **Respiration**, le robot effectue le mouvement de respiration tout en compensant la gravité avec son organe terminal (voir figure 3.8). Le changement de comportement du robot opère toujours avant le dernier essai d'une série et après le premier essai de la série suivante, c'est-à-dire lorsque le participant doit aller répondre à une question sur l'ordinateur. Aller répondre à cette question nécessite de passer devant le Cobot 2 fois (aller et retour).

3.2.5 Déroulement de l'expérimentation

L'expérimentation commence par une phase d'entraînement puis est divisée en trois phases de mesures (voir figure 3.9). Au total, l'expérience dure entre 30 et 45 minutes. Chaque phases comporte 30 essais (3 séries de 10 essais) à la tâche de découpe de bois à l'exception de la phase d'entraînement qui n'en compte que 9. Il y a 10 essais avec chaque niveau de résistance par série et ceux-ci sont répartis de façon aléatoire contrôlée. Tous les 10 essais, il est demandé au participant d'aller répondre à une question sur l'ordinateur à propos de son effort physique ressenti. Cette question sert de diversion pour s'assurer que les personnes passent devant le Cobot 2 plusieurs fois au cours de l'expérimentation. Au total, le participant passera 21 fois devant le robot, soit 7 fois par comportement au cours de l'expérience. Le comportement du Cobot 2 change automatiquement au cours des essais de la tâche et est présenté dans un ordre aléatoire contrôlé.

L'expérimentateur commence par présenter le dispositif expérimental au participant et effectue deux essais de démonstration. Ensuite, le participant se rend à l'ordinateur pour répondre à un questionnaire socio-démographique et signer l'accord de participation. Après cette étape, le participant effectue les 9 essais d'entraînement pour se familiariser avec la tâche et les trois résistances. Une fois l'entraînement effectué, le participant répond à une question de diversion sur son effort physique perçu sur un ordinateur afin de passer pour la première fois devant le Cobot 2.



FIGURE 3.7 – Représentation de la zone de danger du Cobot 2.

Une fois que cela est fait, la première phase commence et le participant effectue ses 30 premiers essais pendant que le Cobot 1 est dans la condition **OFF** du mouvement de fléchissement. Tous les dix essais, le participant est invité à répondre à la question de diversion. À la fin de la première série, le participant est invité à remplir un questionnaire SART à propos de sa perception subjective de sa CS.

Dans la deuxième phase, le Cobot 1 est maintenant réglé sur le mouvement de fléchissement **ON** mais le participant n'est pas informé de sa signification (condition **ON Non expliqué**). Comme dans la première série, le participant effectue 3 fois 10 essais et remplit le questionnaire pour passer devant le Cobot 2. Après les 30 essais, il remplit le questionnaire sur sa perception subjective de la CS.

Avant de commencer la troisième série, l'expérimentateur demande au participant s'il a remarqué les trois inclinaisons du Cobot 1 et s'il a une intuition sur leur signification. Après l'explication, si nécessaire, la dernière série commence. Celle-ci se déroule de la même manière que la précédente, sauf que le participant connaît maintenant la signification des mouvements de signalisation du Cobot 1 (condition **ON Expliqué**). L'expérience s'arrête une fois que le participant a rempli un troisième questionnaire sur la perception de la CS.

3.2.6 Variables indépendantes étudiées

Trois variables indépendantes intra-participant sont manipulées au cours de l'expérience :

3.2.6.1 La modalité du fléchissement

La modalité du fléchissement {OFF, ON Non expliqué, ON Expliqué}. Cette variable correspond aux trois phases liées à la tâche de découpe de bois. Elle représente l'état d'activité du mouvement de fléchissement du Cobot 1.

La modalité *OFF* nous permet d'évaluer la performance et la sécurité des participants lorsque le robot n'effectue pas de mouvement de signalisation. Elle nous permet aussi d'avoir des mesures de références pour nos variables dépendantes décrites plus tard dans cette section.

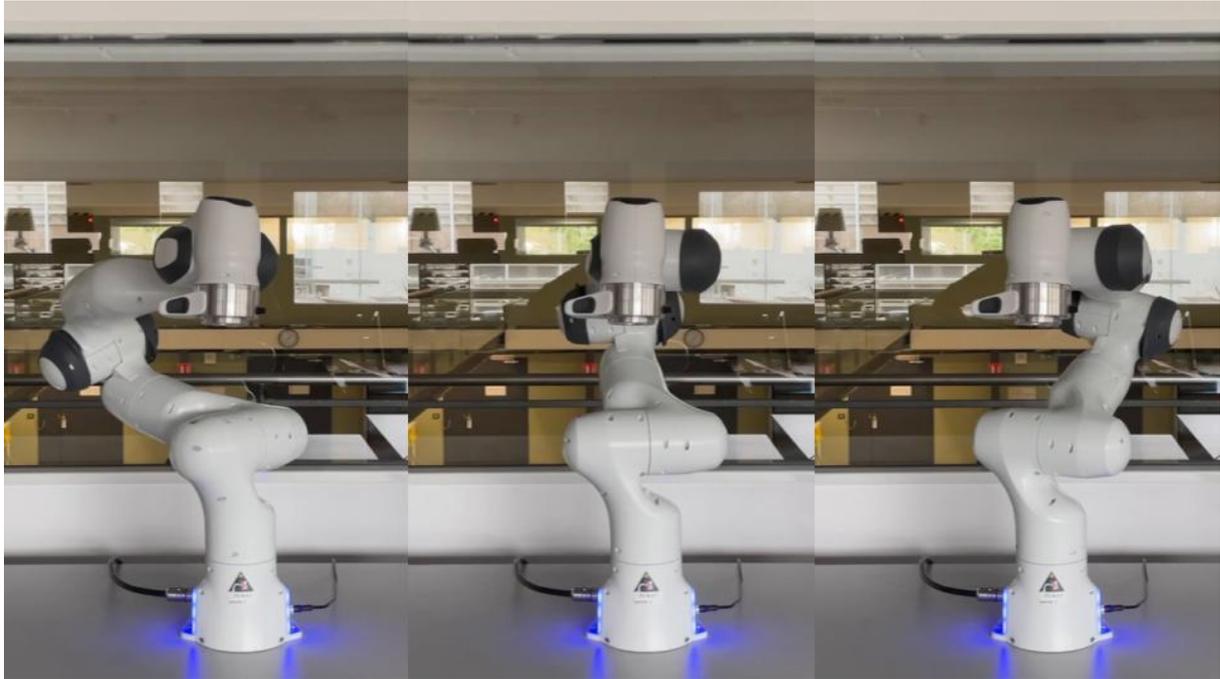


FIGURE 3.8 – Exemple du mouvement de respiration généré par le Cobot 2. Le robot effectue des mouvements de balancier de ces articulations en allant de gauche à droite tout en maintenant la position de son effecteur en un point fixe.

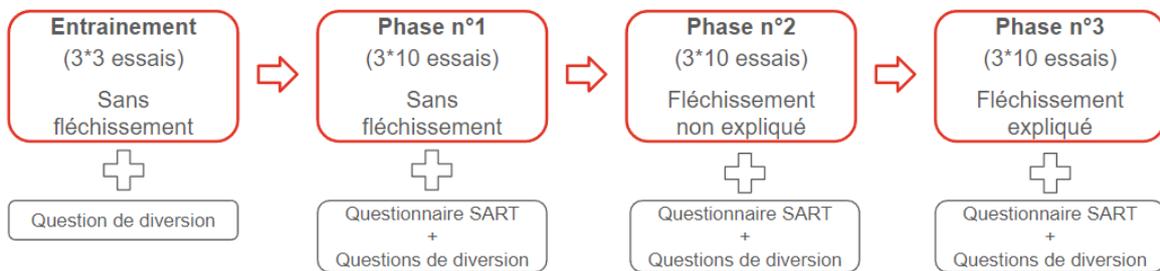


FIGURE 3.9 – Déroulé de la première expérimentation pour chaque participant.

Les modalités *ON Non expliqué* et *ON Expliqué* correspondent aux phases où le robot génère des mouvements de fléchissement. La seule différence entre ces deux modalités réside dans le fait que l'expérimentateur ne précise d'abord pas qu'elle est la signification de ces mouvements puis il l'explique ensuite aux participants avant de commencer la dernière phase. La modalité *ON Non expliqué* nous permet de vérifier la saillance du mouvement de signalisation. La modalité *ON Expliqué* permet de vérifier l'efficacité réelle du mouvement sur la performance et la sécurité des personnes lorsqu'elles connaissent la signification du mouvement généré. Cela permet aussi de préciser la saillance du mouvement en comparant les deux modalités ON.

3.2.6.2 Résistance générée par le Cobot 1

La résistance {Faible, Moyenne, Haute}. Cette variable correspond aux trois résistances que le robot peut produire sur la planche pendant la tâche de découpe de bois.

Ces trois résistances nécessitent des participants qu'ils poussent plus ou moins fort sur la planche. Ces résistances sont produites sans annonce au préalable aux participants. Ils sont

ainsi hors de la boucle des actions du robot. Couplée à la modalité de fléchissement, cette variable nous permet d'observer si le mouvement de signalisation permet bien de ré-introduire les participants dans la boucle. Cela s'observerait notamment dans les mesures réalisées.

3.2.6.3 Comportements du Cobot 2

Le comportement du Cobot 2 {Immobile, Actif et Respiration}. Cette variable correspond aux trois comportements que le Cobot 2 peut adopter pendant l'expérimentation.

Le comportement *Immobile* nous permet de reproduire la croyance qu'un robot inactif est un robot éteint. Nous nous attendons à ce que les participants soient moins vigilants quand ils passent proche du robot.

Les Comportements *Actif* et de *Respiration* nous permettent de comparer l'effet du mouvement de signalisation sur la vigilance des participants quand le robot est en mouvement. Nous nous attendons à ce que les participants soient aussi vigilants quand le robot respire et quand il est Actif.

3.2.7 Variables dépendantes mesurées

Des données objectives et subjectives sont enregistrées au cours de l'expérience à partir de la première phase (fléchissement OFF). Les données objectives sont obtenues à l'aide des enregistrements (logs) récupérés par le Cobot 1 à chaque essai, à l'aide des capteurs de force et à l'aide du capteur de distance laser 2D du Cobot 2. Les données subjectives sont recueillies à l'aide de questionnaires remplis après chaque phase.

Le temps de réalisation d'un essai - Le temps est exprimé en seconde (s). Un essai plus rapide indique une meilleure performance dans la tâche et donc une meilleure CS. Un participant met plus de temps à terminer l'essai si celui-ci est saccadé en raison de la résistance. Plus sa force initiale est appropriée, plus il exécute la tâche rapidement et sans à-coups. L'ajout d'informations sur la résistance produite par le robot devrait réduire les saccades et le temps nécessaire pour réaliser un essai. Pour faciliter l'analyse des données, les données de temps sont moyennées par modalité de fléchissement et résistance.

La force moyenne au cours d'un essai - La force est exprimée en newton (N). Cette mesure se réfère à la force moyenne au cours d'un essai. La production d'une force adéquate le long du rail correspond à une meilleure CS. Sans information a priori sur la résistance, on s'attend à ce que la force du participant soit plus élevée que nécessaire pour les faibles résistances et plus faible que nécessaire pour les fortes résistances. Ainsi, le fait de soutenir la CS du participant en utilisant le mouvement de signalisation devrait lui permettre d'ajuster sa force de départ. Pour faciliter l'analyse des données, les données de force sont moyennées par modalité de fléchissement et résistance.

La distance de passage par rapport au Cobot 2 - La distance est exprimée en mètre (m). Cette mesure permet de vérifier l'effet du mouvement de Respiration. Un participant qui se sent en sécurité à proximité du robot a tendance à passer près de lui, car c'est le chemin le plus court vers l'ordinateur utilisé pour la question de diversion. Inversement, si le participant voit un risque à passer devant le robot, il l'évite, ce qui allonge le chemin vers l'ordinateur.

Le score au questionnaire SART - Il est calculé à partir des réponses des participants en utilisant la méthode proposée par Taylor (2017). Il se concentre sur la demande attentionnelle

(instabilité, variabilité et complexité de la situation), le soutien à la réserve attentionnelle (éveil, capacité mentale de réserve, concentration et division de l'attention) et la compréhension de la situation (quantité et qualité de l'information et familiarité). Les participants doivent évaluer chaque dimension sur une échelle de Likert sept points (1 pour faible et 7 pour élevé).

3.2.8 Hypothèses opérationnelles

Conformément aux hypothèses proposées en section 3.1, nous définissons plusieurs hypothèses opérationnelles.

- **H1** : Les participants possèdent une meilleure CS lorsque le Cobot 1 génère des mouvements de fléchissement. Plus précisément, nous nous attendons à ce que les participants aient une meilleure CS pour les modalités de fléchissement **ON Expliqué** et **ON Non expliqué** par rapport à la modalité **OFF**.

Nous utilisons trois de nos quatre mesures pour évaluer la CS des participants par rapport au Cobot 1. Le temps de l'essai, la force produite pendant l'essai et le score obtenu pour chaque phase de la tâche de découpe du bois. Cela nous donne trois sous hypothèses :

H1.1 : Les participants sont plus rapides pour accomplir leurs essais dans les modalités **ON Expliqué** et **ON Non expliqué** par rapport à la modalité **OFF**, quelle que soit la résistance du robot.

H1.2 : Les participants adaptent mieux leur force à la résistance dans les modalités **ON Expliqué** et **ON Non expliqué** par rapport à la modalité **OFF**.

H1.3 : Les participants ont de meilleurs scores au questionnaire SART pour les modalités **ON Expliqué** et **ON Non expliqué** par rapport à la modalité **OFF**.

- **H2** : Les participants possèdent une meilleure CS lorsque le Cobot 2 génère des mouvements de Respiration. Plus précisément, nous nous attendons à ce que les participants aient une meilleure CS pour le comportement **Respiration** que pour le comportement **Immobile** et aussi similaire au comportement **Actif**.

Nous utilisons la mesure de distance pour évaluer la CS des participants par rapport au Cobot 2. Nous déclinons notre hypothèse opérationnelle en deux sous hypothèses :

H1.1 : Les participants s'éloignent plus du Cobot 2 lorsqu'il est en **Respiration** par rapport à quand il est **Immobile**.

H1.2 : Les participants s'éloignent autant du Cobot 2 lorsqu'il est en **Respiration** par rapport à quand il est **Actif**.

3.3 Analyse des résultats

Tous les résultats ont été considérés comme significatifs au niveau de confiance de 95% (c'est-à-dire une valeur $p < 0.05$). Le logiciel Rstudio (version R 4.3.1) a été utilisé pour effectuer l'analyse statistique.

Pour chaque test statistique, nous avons d'abord vérifié la condition de normalité à l'aide d'un test de Shapiro-Wilk. Les distributions suivent une loi normale pour le score au questionnaire SART ($p = .535$), mais pas pour le temps ($p < .001$), la force ($p < .001$) et la distance ($p < .001$). L'homogénéité des variances des scores SART a également été vérifiée à l'aide d'un test de Levene ($p = .755$). Comme les conditions de normalité et d'homogénéité des variances sont respectées, nous avons pu utiliser l'ANOVA pour analyser les résultats du questionnaire

SART. Pour les temps de réalisation d'essai et la force, nous avons effectué nos calculs en utilisant la version paramétrique de l'ANOVA pour analyser les temps et la force en fonction de la Modalité et de la Résistance. Cela nous a aussi permis d'étudier s'il existait un effet d'interaction entre les deux variables. Pour étudier l'effet du comportement du Cobot 2 sur la distance de passage, nous avons réalisé un test de Friedman (version non paramétrique de l'ANOVA)

3.3.1 Effet de la modalité de fléchissement et de la résistance du Cobot 1 sur le temps

Une ANOVA à mesures répétées à deux facteurs a été réalisée pour évaluer l'effet du mouvement de fléchissement (OFF, ON Non expliqué et ON Expliqué) et des résistances (Faible, Moyenne et Haute) sur le temps. Comme chacune de nos variables indépendantes est à trois niveaux et que nous sommes dans un cas de mesures répétées, nous devons tester la sphéricité de nos données. Celle-ci a été vérifiée pour la modalité de fléchissement ($p = .473$), la résistance ($p = .630$) et l'interaction des deux variables ($p = .424$). Il n'est donc pas nécessaire d'appliquer une correction avant de calculer l'ANOVA.

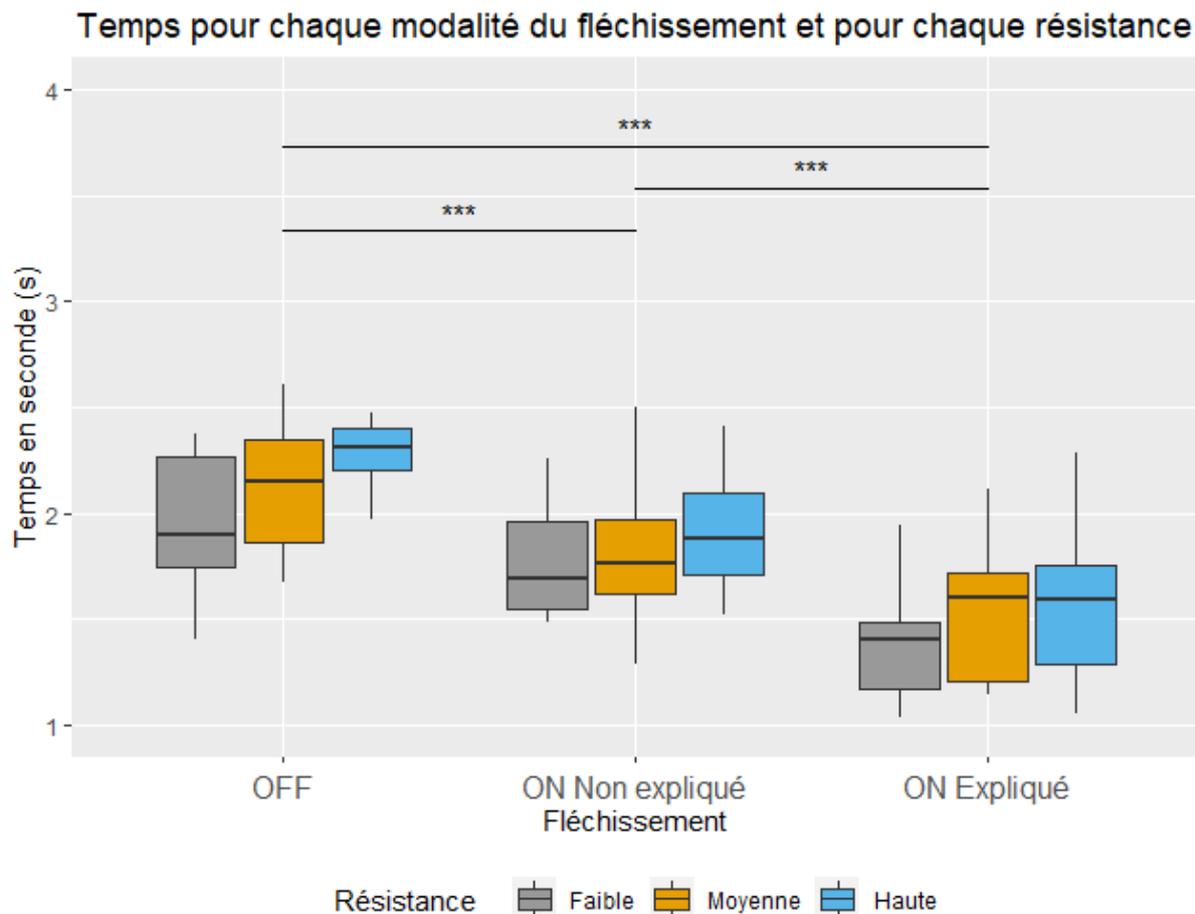


FIGURE 3.10 – Diagramme en boîte du temps mesuré pour chaque modalité du mouvement de fléchissement et pour chaque résistance.

3.3.1.1 Effet de la modalité de fléchissement sur le temps

L'ANOVA à mesure répétée montre un effet significatif des modalités de fléchissement sur le temps ($F(2, 30) = 98.845$; $p < .001$). Des tests post hoc avec correction de Bonferroni ont

révélé que les participants terminaient plus rapidement leurs essais lorsque le fléchissement était ON Expliqué ($M = 1.52$, $SD = 0.369$) que ON Non expliqué ($M = 1.86$, $SD = 0.369$), $t = -8.89$, $p < .001$ et OFF ($M = 2.18$, $SD = 0.45$), $t = 17.6$, $p < .001$. Aussi, les participants étaient plus rapide lorsque le fléchissement était ON Non Expliqué que OFF $t = 7.64$, $p < .001$.

3.3.1.2 Effet de la résistance sur le temps

L'ANOVA a mesure répétée montre un effet significatif des résistances sur le temps ($F(2, 30) = 36.398$; $p < .001$). Des tests post hoc avec correction de Bonferroni ont révélé que les participants terminaient plus rapidement leurs essais lorsque la résistance était Faible ($M = 1.74$, $SD = 0.44$) que Moyenne ($M = 1.86$, $SD = 0.474$), $t = -3.34$, $p < .01$ et Haute ($M = 1.96$, $SD = 0.506$), $t = -6.70$, $p < .001$. Aussi, les participants étaient plus rapide lorsque la résistance était Moyenne que Haute $t = 3.27$, $p < .01$.

3.3.1.3 Effet de l'interaction de la modalité et de la résistance sur le temps

L'ANOVA a mesure répétée montre un effet significatif de l'interaction entre les modalités de fléchissement et les résistances sur le temps ($F(4, 60) = 3.329$; $p < .05$). Si nous nous concentrons sur les interactions entre les modalités du mouvement de signalisation pour une même résistance, nous pouvons observer une diminution du temps nécessaire pour réaliser les essais comme illustré dans la figure 3.10.

L'ensemble de ses résultats montrent bien que les participants ont été plus rapides pour terminer leurs essais dans la modalité de fléchissement ON Expliqué puis dans la modalité ON Non Expliqué et ce, qu'elle que soit la résistance, ce qui confirme l'hypothèse H1.1.

3.3.2 Effet de la modalité de fléchissement et de la résistance du Cobot 1 sur la force

Une ANOVA à mesures répétées à deux facteurs a été réalisée pour évaluer l'effet du mouvement de fléchissement (OFF, ON Non expliqué et ON Expliqué) et des résistances (Faible, Moyenne et Haute) sur la force. Comme chacune de nos variables indépendantes est à trois niveaux et que nous sommes dans un cas de mesures répétées, nous devons tester la sphéricité de nos données. Celle-ci a été vérifiée pour la modalité de fléchissement ($p = .129$), la résistance ($p = .375$) mais pas pour l'interaction des deux variables ($p < .001$). Il est donc nécessaire d'appliquer une correction avant de calculé l'ANOVA a mesure répétée. Une correction de Greenhouse-Geisser a été appliquée pour l'ANOVA d'interaction.

3.3.2.1 Effet de la modalité de fléchissement sur la force

L'ANOVA a mesure répétée montre un effet significatif des modalités de fléchissement sur la force ($F(2, 30) = 98.845$; $p < .001$). Des tests post hoc avec correction de Bonferroni ont révélé que les participants avaient besoin de pousser moins fort pour réaliser les essais dans la modalité ON Expliqué ($M = 58.8$, $SD = 18.1$) que dans la modalité ON Non expliqué ($M = 62.4$, $SD = 13.0$), $t = -2.96$, $p < .05$ et dans la modalité OFF ($M = 63.7$, $SD = 10.0$), $t = 3.10$, $p < .01$. Aussi, aucune différence significative n'a été observée entre les modalités de fléchissement ON Non Expliqué que OFF $t = 1.65$, $p = .318$.

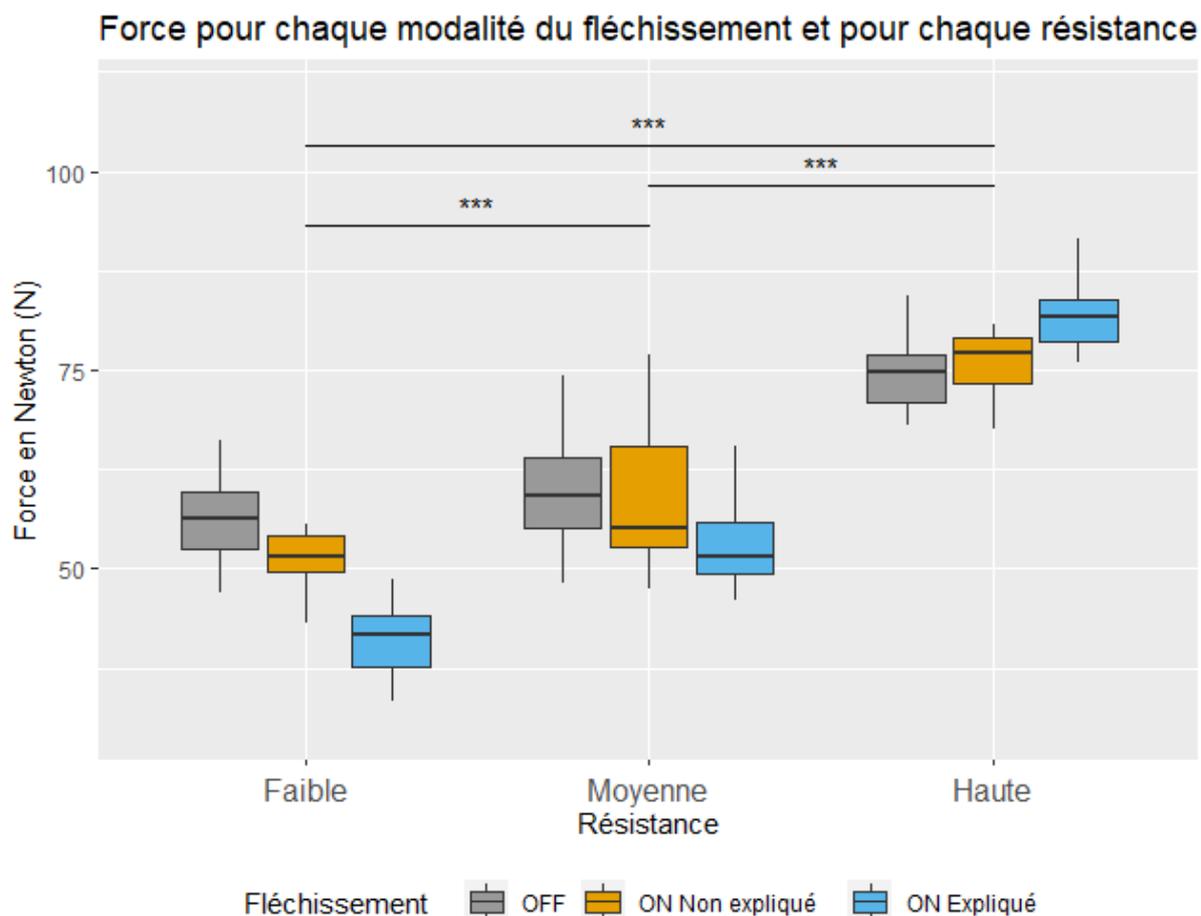


FIGURE 3.11 – Diagramme en boîte de la force mesurée pour chaque modalité du mouvement de fléchissement et pour chaque résistance.

3.3.2.2 Effet de la résistance sur la force

L'ANOVA à mesure répétée montre un effet significatif des résistances sur la force ($F(2, 30) = 36.398$; $p < .001$). Des tests post hoc avec correction de Bonferroni ont révélé que les participants devaient pousser avec moins de force lorsque la résistance était Faible ($M = 49.6$, $SD = 8.14$) que lorsqu'elle était Moyenne ($M = 57.5$, $SD = 8.27$), $t = -6.55$, $p < .001$ ou Haute ($M = 77.8$, $SD = 6.84$), $t = -17.3$, $p < .001$. Aussi, les participants ont poussés avec moins de force lorsque la résistance était Moyenne que Haute $t = -16.0$, $p < .001$.

3.3.2.3 Effet de l'interaction de la modalité et de la résistance sur la force

L'ANOVA à mesure répétée montre un effet significatif de l'interaction entre les modalités de fléchissement et les résistances sur la force ($F(2.58, 38.74) = 29.540$; $p < .001$). Concernant les interactions entre les modalités des mouvements de signalisation pour une même résistance, les résultats sont variés. Pour la résistance Faible, les participants ont produit plus de force pour pousser la planche dans la modalité OFF ($M = 56.3$, $SD = 5.71$) que dans les modalités ON Non expliqué ($M = 51.3$, $SD = 5.14$) et ON Expliqué ($M = 41.3$, $SD = 4.92$). Une différence supplémentaire est observée entre les modalités ON Non expliqué et ON Expliqué. Pour la résistance Moyenne, les participants ont produit une force similaire entre les modalités OFF ($M = 60.0$, $SD = 7.58$) et ON Non Expliqué ($M = 58.6$, $SD = 8.63$) et une force plus faible pour la modalité ON Expliqué ($M = 54.0$, $SD = 7.82$). De même, les participants ont eu besoin de

moins de force pour la modalité ON Expliqué que pour la modalité ON Non expliqué. Pour la résistance Haute, ils ont appliqué plus de force dans la modalité ON Expliqué ($M = 81.2$, $SD = 7.72$) que dans les modalités ON Non expliqué ($M = 77.4$, $SD = 6.77$) et OFF ($M = 74.9$, $SD = 4.43$). Une force plus faible peut également être observée entre les modalités OFF et ON Non expliqué, comme l'illustre la figure 3.11.

Ces résultats montrent que les participants ont su correctement adapter leur force lorsque le Cobot 1 générait des mouvements de fléchissement, que leur signification soit expliquée (ON Expliqué) ou non (ON Non expliqué). Ainsi, nous considérons que l'hypothèse H1.2 est confirmée.

3.3.3 Effet de la modalité de fléchissement sur le questionnaire SART

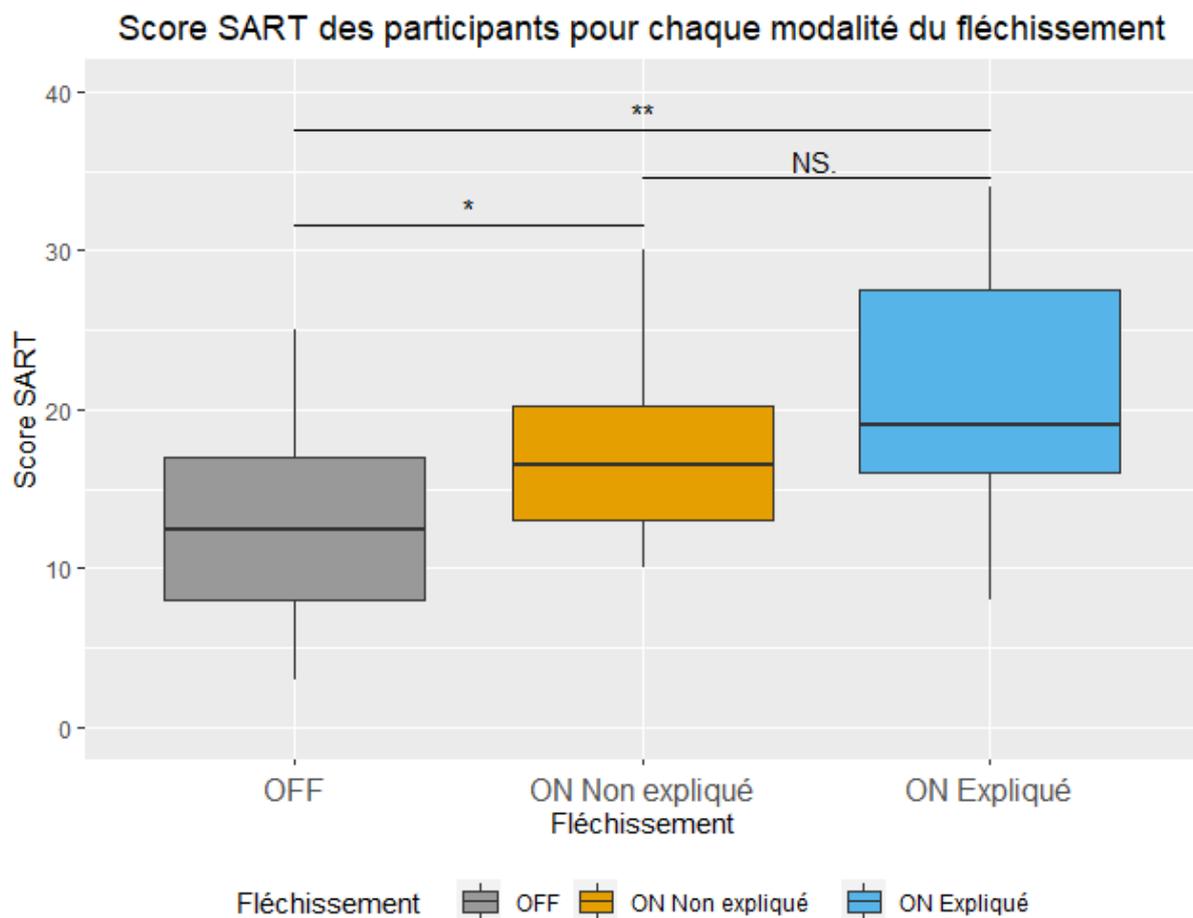


FIGURE 3.12 – Diagramme en boîte du score SART calculé pour chaque modalité du mouvement de fléchissement.

Nous avons effectué une ANOVA à mesures répétées pour évaluer l'effet du mouvement de fléchissement sur la CS des participants. Nous avons trouvé un effet global du mouvement de fléchissement sur les réponses des participants aux questionnaires SART ($F(2, 30) = 8.19$; $p < .001$). Le test post-hoc utilisant la correction de Bonferroni révèle que le participant avait une moins bonne CS lorsque le mouvement de fléchissement était OFF ($M = 13.31$, $SD = 6.14$) que lorsque la modalité était ON Non expliqué ($M = 17.62$, $SD = 5.95$), ($t(16) = -4.31$, $p < .05$), ou ON Expliqué ($M = 20.81$, $SD = 7.35$), ($t(16) = -7.5$, $p < .05$). Enfin, il n'est pas

possible de démontrer que les modalités ON Non expliqué et ON Expliqué sont significativement différentes ($p = 0.130$), ($t(16) = 3.19$, $p = .168$). Ces résultats sont illustrés dans la figure 3.12.

Les participants semblent donc avoir eu une meilleure conscience de situation lorsque le Cobot 1 effectué des mouvements de signalisation de fléchissement, qu'ils soient expliqués ou non. Cela confirme l'hypothèse H1.3.

Étant donné que nos trois hypothèses intermédiaires, H1.1, H1.2 et H1.3, ont été confirmées par nos résultats, nous considérons que notre hypothèse H1 a été validée.

3.3.4 Effet du comportement du Cobot 2 sur la distance de passage

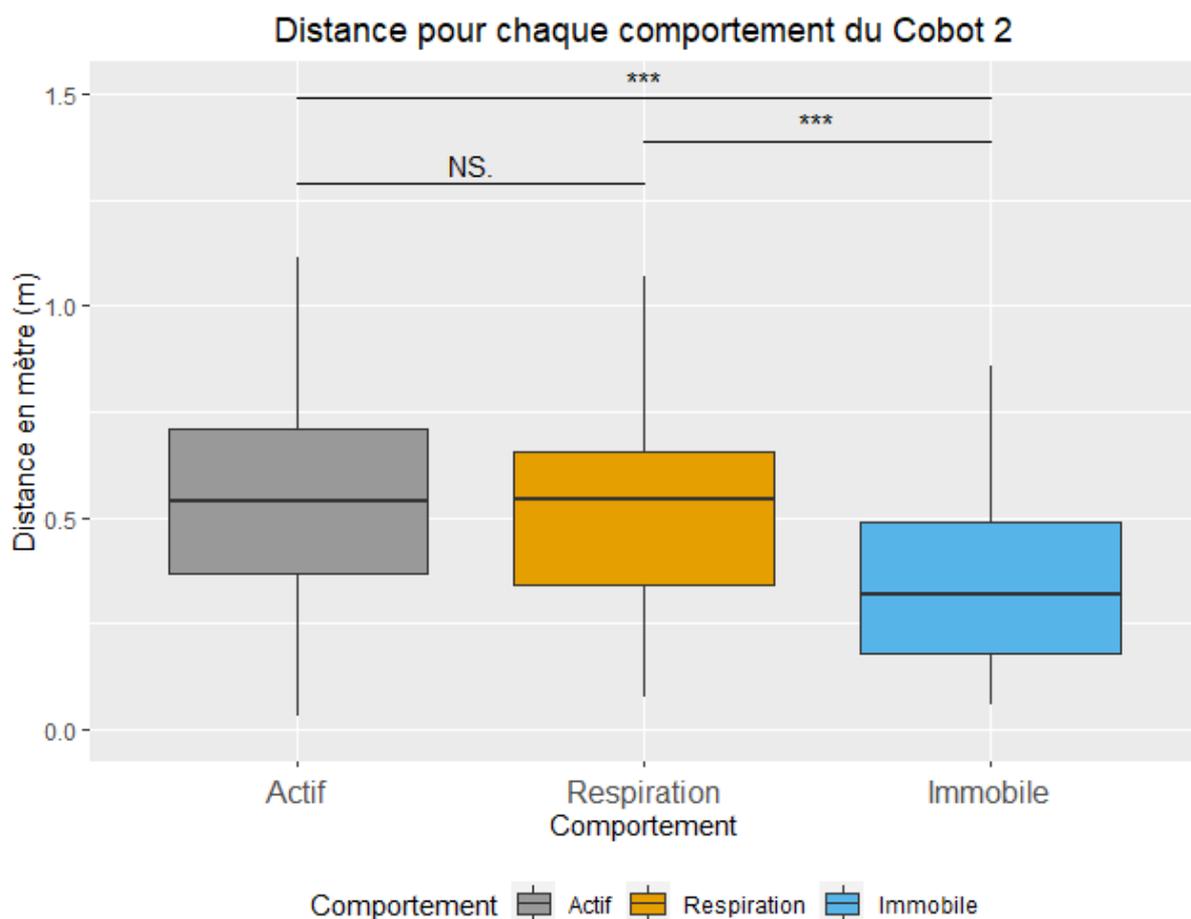


FIGURE 3.13 – Diagramme en boîte de la distance mesurée pour chaque modalité du mouvement de Respiration.

Pour la distance au Cobot 2, une ANOVA à mesures répétées a été calculée pour évaluer l'effet du mouvement de signalisation d'état (Actif, Respiration, Immobile) sur les comportements humains. L'analyse révèle un effet global statistiquement significatif sur la distance au Cobot 2 ($\chi^2(2) = 9.75$, $p < .01$). Les comparaisons multiples post hoc utilisant une correction de Bonferroni ont également montré que les participants passaient plus proche du Cobot 2 lorsqu'il était Immobile (Mdn = 0.318) plutôt que lorsqu'il était Actif (Mdn = 0.536), $Z = 0.216$, $p < .001$ ou qu'il respirait (Mdn = 0.543), $Z = -0.180$, $p < 0.001$. D'autre part, il n'y avait

pas de différences significatives entre les comportements actifs et de respirations ($p = 0.564$), $Z = 0.017$, $p = 0.575$. Ces résultats sont illustrés dans la figure 3.13.

Ces résultats vont dans le sens de notre hypothèse H2. En effet, les participants se sont plus éloignés du Cobot 2 lorsque celui-ci générait des mouvements de Respiration par rapport aux moments où il restait Immobile (H1.1). Aussi, les participants se sont autant éloignés du Cobot 2 quand il était Actif qu'en Respiration (H2.2).

3.4 Discussion

L'objectif de ce chapitre était d'évaluer les effets des mouvements de signalisation sur la CS des humains partageant des tâches et un environnement de travail avec des robots. Plus précisément, nous avons mis en œuvre deux mouvements de signalisation à l'aide de deux robots collaboratifs ou cobots : l'un effectuait un mouvement de fléchissement (mouvement de signalisation d'action) et l'autre un mouvement de respiration (mouvement de signalisation d'état). Ces mouvements ont pour but de soutenir la CS des opérateurs.

3.4.1 Mouvement d'action et maintien dans la boucle d'action du robot

Les résultats objectifs et subjectifs confirment l'hypothèse **H1** qui suggère que le mouvement de fléchissement améliore la CS de l'individu interagissant avec le robot. L'activation du mouvement de signalisation d'action réduit le temps de réalisation de la tâche, ce qui indique qu'il a un impact positif sur les performances de l'utilisateur. Cela souligne également sa lisibilité puisque sa signification semble avoir été comprise même sans explication au préalable. Cet impact est plus prononcé lorsque le comportement d'assistance est expliqué. Dans le contexte du cas d'utilisation, cela s'explique par une meilleure connaissance de la tâche (amélioration du modèle mental). Cette amélioration est illustrée par l'évolution de la force appliquée par les sujets selon les trois modalités. Lorsque les participants n'avaient aucune indication sur la résistance, ils n'estimaient pas à l'avance la force nécessaire. À l'inverse, une fois sa signification connue, les participants parviennent mieux à gérer leurs efforts pour réaliser la tâche. Plus précisément, le participant applique globalement plus de force lorsque le robot indique une résistance Haute et, à l'inverse, il applique moins de force lorsqu'une faible résistance est attendue. Ceci illustre l'impact positif de l'assistance proposée, en effet le participant adapte sa stratégie de manipulation en fonction de la résistance ce qui illustre une amélioration du modèle mental de la tâche. Le mouvement de signalisation de fléchissement semble bien avoir ré-introduit l'humain dans la boucle d'action du robot et l'a extrait d'une potentielle CS dégradée comme vu dans le chapitre 2.

Enfin, en ce qui concerne le mouvement de fléchissement, les scores d'CS obtenus à partir du questionnaire SART confirment nos résultats objectifs. Les résultats montrent une amélioration de la CS lorsque les participants connaissent la signification du mouvement de signalisation d'action. Bien que le questionnaire SART soit une mesure subjective, la performance physique semble être cohérente avec les résultats obtenus.

3.4.2 Mouvement d'état et soutien au modèle mental de l'individu

Les distances de passage mesurées vers le robot confirment l'hypothèse **H2** qui suggère que le mouvement de respiration améliore la CS de l'individu interagissant avec le robot. En effet, le but du mouvement de respiration est de sensibiliser la personne à l'état du robot. Même si un

robot est Immobiler, il n'est pas nécessairement éteint et il est donc important d'être attentif et vigilant à sa présence et, éventuellement, à son activation. Grâce au mouvement de respiration, la personne sait que le robot est dans un état d'inactivité mais qu'il peut reprendre sa tâche à tout moment. Cela est d'autant plus important que le robot n'interagit pas directement avec l'humain mais partage seulement son environnement de travail. Le fait qu'il n'y ait pas de différence significative entre la distance de passage des sujets du robot lorsqu'il effectue un mouvement de respiration et un mouvement d'activité suggère que les deux sont perçus et interprétés de manière similaire. Les personnes sont alors plus attentives au robot lorsqu'il effectue un mouvement de signalisation d'état qui signale son état. Bien que dans les deux cas (Immobiler et Respiration) le robot soit dans un état d'attente, les sujets ont tendance à entrer dans l'espace de travail du robot lorsqu'il est Immobiler, alors qu'ils ont tendance à s'en éloigner lorsqu'il respire, ce qui indique que le mouvement de signalisation d'état transmet des informations d'activité à l'utilisateur et accroît sa vigilance.

Le mouvement de respiration contribue donc à améliorer le modèle mental de l'individu en rendant le robot plus transparent à propos de son état (Bonarini, 2020). Comme pour le mouvement de fléchissement, celui de la respiration agit comme un support de la CS. Plus précisément, le modèle mental est alimenté de telle sorte que la connaissance de l'état du robot n'est plus ambiguë pour la personne. Cela contribue à éviter de placer les personnes dans une situation de modèle mental errant comme vu dans le chapitre 2.

3.4.3 Saillance des mouvements de signalisation

Sur la base de la validation des hypothèses **H1** et **H2**, notre hypothèse initiale **H0** est soutenue. En prouvant l'effet positif du fléchissement et des mouvements de respiration, nous démontrons l'effet positif des mouvements de signalisation sur la CS. L'ajout des deux mouvements de signalisation aux robots contribue positivement à l'amélioration du modèle mental de la personne interagissant avec les deux robots. Ces mouvements ont l'avantage de ne pas affecter la tâche principale du robot du fait qu'ils soient exécutés grâce à la redondance du robot. Il s'agit d'une caractéristique essentielle dans l'industrie et d'un avantage évident de l'approche proposée. Ils agissent comme un complément d'information par le biais d'un canal de communication indirect qui n'affecte pas les performances globales du robot.

Dans notre expérimentation, ils semblent avoir été un moyen saillant de partager des informations avec les participants et de soutenir leur CS. Cela souligne la lisibilité des mouvements employés (Dragan et al., 2013, 2015). Ainsi, cela a contribué à rendre les deux robots plus transparents pour les participants (Lyons, 2013; Bonarini, 2020). D'une part, le mouvement de fléchissement a empêché les individus d'être hors de la boucle d'action du robot et a ainsi renforcé leur modèle mental en lien avec la tâche de collaboration. Ce mouvement a également soutenu leur projection (niveau 3 de la CS) en les informant de l'action que le robot était en train de réaliser. D'autre part, le mouvement de respiration a permis d'informer les participants d'une potentielle reprise d'action du robot et les a ainsi empêché d'avoir un modèle mental erroné de son état. Là encore, la projection du participant est soutenue car il perçoit le mouvement du robot, comprend sa potentielle reprise d'activité et projette un danger d'approcher du robot. Ces situations correspondent aux schémas d'accidents n°1 et n°2 mis en évidence dans le chapitre 2.

Cela démontre que des situations accidentogènes peuvent être évitées en utilisant des moyens de communication appropriés. Plus précisément, il semblerait que les mouvements de signalisation ont été efficaces parce qu'ils ont soutenu la capacité de projection des participants. Cette

dernière correspond au troisième niveau de la CS et est la dernière étape avant la prise de décision d'action de l'individu. Ainsi, en rendant la communication suffisamment saillante et en communiquant l'information adéquate, nous pouvons influencer la projection de la personne afin qu'elle prenne la bonne décision. Dans le cas où l'information ne soutiendrait pas directement le niveau 3 de la CS, nous ne pourrions pas être assuré que l'opérateur dispose du modèle mental souhaité de l'état, ou de l'action, du robot. Cependant, une étape importante de la communication réside dans sa perception. Dans notre expérimentation, le Cobot 1 était constamment dans le champs visuel du participant pendant la tâche de collaboration. Le Cobot 2 lui était placé derrière le participant mais était dans son champs de vision dès lors que ce dernier se retournait et se dirigeait vers l'ordinateur. Cela nous a assuré que les mouvements étaient toujours perçus lorsque cela était nécessaire. De ce fait, nous nous questionnons à propos de la saillance des mouvements dans le cas où l'humain et le robot ne collaborent pas sur une même tâche et que l'humain est concentré sur une tâche située dans un espace de travail autre que celui du robot. Cela correspondrait au schéma d'accident n°3 du chapitre 2 dans lequel l'humain tunnelise son attention sur une tâche et se retrouve hors de la boucle d'action du robot.

3.4.4 Limites

La limite potentielle de ce travail est que nous avons choisi de ne pas randomiser les essais. Les deux premières modalités auraient pu être randomisées pour s'assurer que les effets d'apprentissage de la tâche n'influençaient pas les résultats pour Cobot 1. En revanche, la dernière modalité ne pouvait pas être randomisée car elle était précédée d'une explication verbale donnée après les deux premières modalités. En pratique, si l'on considère le temps de réalisation de chaque essai, on peut constater un léger effet d'apprentissage intra-modalité. En revanche, si l'on considère les différences entre les modalités, on observe des chutes importantes du temps de réalisation lors du passage d'une modalité à l'autre (voir figure 3.14).

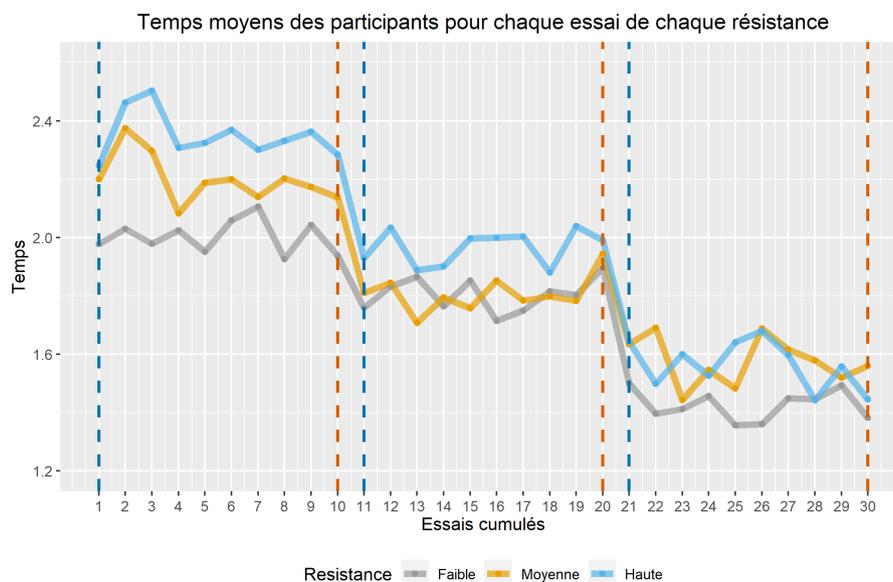


FIGURE 3.14 – Inter-différence du temps pour chaque résistance entre chaque modalité. La ligne pointillée bleue correspond au premier essai des modalités OFF, ON Non expliqué et ON Expliqué. La ligne pointillée orange correspond au dernier essai des modalités OFF, ON Non expliqué et ON Expliqué.

Ces changements abrupts ne semblent pas être un effet de l'apprentissage continu de la tâche uniquement et peuvent être interprétés comme une conséquence du mouvement de flé-

chissement (et des explications associées dans la troisième modalité). Ceci est confirmé par les questionnaires CS remplis par chaque participant.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé le concept de mouvement de signalisation en tant que moyen de communication non-verbale dont les robots peuvent être équipés. Ces mouvements sont un moyen de soutenir les interactions avec un humain en renforçant la sécurité et la conscience de la situation (CS) de ce dernier. Un point fort de notre contribution réside dans le fait que les robots peuvent à la fois réaliser des tâches et communiquer grâce à la redondance de leurs articulations. Les mouvements de signalisation se déclinent en deux types : les mouvements dits *d'actions*, liés à la tâche du robot, et les mouvements dits *d'état*, liés aux états du robot. Ce chapitre nous a permis de répondre à la question 3 :

Question 3

La communication d'un robot à l'aide de ses mouvements permet-elle d'améliorer la conscience de situation d'un humain avec qui il interagit ?

Nous avons proposé une expérimentation dans laquelle nous vérifions l'effet de ces mouvements sur la CS. Nous avons utilisé un mouvement de respiration comme un mouvement de signalisation d'état. Ce mouvement permettait d'informer l'opérateur de l'activité du robot et d'une potentielle reprise de tâche. Aussi, nous avons conçu un mouvement de fléchissement comme mouvement de signalisation d'action. Ce mouvement a permis de ré-introduire nos participants dans la boucle d'action du robot. Nos résultats ont montré que ces mouvements pouvaient tous deux contribuer à l'amélioration du modèle mental lié à l'environnement et à la tâche (respectivement). Ils contribuent donc à l'amélioration de la CS. Le mouvement de respiration a rendu les personnes plus conscientes de leur environnement de travail et le mouvement de fléchissement les a informées de l'évolution de leur tâche. Aussi, ces mouvements semblent suffisamment lisibles pour renforcer la transparence du robot et être correctement compris par les individus.

Dans le chapitre 2, nous avons mis en évidence 5 schémas systématiques d'accidents. Ces schémas consistaient en l'apparition d'un ou de plusieurs démons de la CS de manière successives jusqu'à l'accident. Dans ce chapitre, nous avons montré que les mouvements de signalisation était un moyen d'empêcher l'apparition de 3 de ces schémas d'accidents. Le mouvement de signalisation d'état (respiration) a rendu les participants plus vigilant vis-à-vis du robot et de son activité. Ils ont associés ce mouvements au fait que le robot soit actif et ont compris le potentiel risque de s'approcher du robot. Par sa saillance, le mouvement de signalisation d'action nous a permis de ré-introduire les personnes dans la boucle d'action du robot. De ce fait, leur capacité de projection sur la future action du robot était soutenue.

Une première perspective de poursuite de ce travail serait de vérifier si nos résultats sont dues à l'entrave des capacités de projection. Dans le présent chapitre, les participants ne pouvaient pas deviner à l'avance la résistance générée par le robot lorsqu'il ne générait pas de mouvement de signalisation. A l'inverse, la perception du mouvement de signalisation a permis cette projection. Il serait alors intéressant d'étudier l'effet des mouvements de signalisation dans le cas où les participants peuvent anticiper les prochaines tâches du robot. Cela permettrait

notamment de déterminer l'influence réelle des mouvements proposés sur le modèle de la CS.

Une autre perspective comprend la prise en compte des capacités attentionnelles des personnes. Dans le chapitre 2, nous avons pu montré qu'une dégradation de l'attention, la tunnélisation, pouvait être un facteur menant à des accidents de robotique industrielle. Dans le présent chapitre, l'agencement du dispositif expérimentale faisait que le Cobot 1, qui générait des mouvements de signalisation d'action, était toujours dans le champs visuel des participants tout au long de sa tâche. Pour le Cobot 2, les participants avaient aussi le robot dans leur champs visuel lorsqu'ils passaient devant lui. Il serait alors intéressant d'explorer la saillance des mouvements dans le cas où le robot est en vision périphérique du participant.

Enfin, pour le moment la génération de ces mouvements se fait par défaut, quelle que soit l'expertise des personnes ou même leur CS au cours de la tâche. Il pourrait être intéressant d'étudier les moyens de générer ces mouvements de manière réactive à des défauts de CS détectés. Cela nécessiterait d'être capable de détecter une CS défaillante et, également, d'intégrer cette information à propos de la CS dans le planificateur de tâche du robot. Cela serait un moyen de corriger, en temps réel, des faiblesses ou des défaillances potentielles des opérateurs en matière de CS.

Chapitre 4

Étude de l'effet des mouvements de signalisation et des capacités de projection sur le partage d'attention

Table des matières

Introduction	81
4.1 Influence des capacité de projection sur le partage d'attention	82
4.1.1 Capacité de projection dans le modèle de la conscience de situation	82
4.1.2 Capacités attentionnelles dans la coopération humain-robot	83
4.1.3 Hypothèses théoriques	84
4.2 Méthode expérimentale	85
4.2.1 Contexte de l'expérimentation	85
4.2.2 Participants	86
4.2.3 Tâches accomplies pendant l'expérimentation	86
4.2.3.1 Jeu des Tours de Hanoï	86
4.2.3.2 Tâche de construction de coopération	87
4.2.4 Matériel et dispositif expérimental	87
4.2.5 Déroulement de l'expérimentation	90
4.2.6 Variables indépendantes étudiées	92
4.2.6.1 Ordre de passage	92
4.2.6.2 Modalités expérimentale	92
4.2.6.3 Actions à effectuer	92
4.2.7 Variables dépendantes mesurées	92
4.2.8 Hypothèses opérationnelles	93
4.3 Analyse des résultats	93
4.3.1 Effet de l'ordre de passage de l'expérimentation	94
4.3.2 Effet de la capacité de projection sur le temps d'attente du robot	94
4.3.3 Effet de l'implication dans les tâches sur la conscience de situation des participants	94
4.3.3.1 Effet de l'implication dans les tâches sur le taux de regards	94
4.3.3.2 Effet de l'implication dans les tâches sur le score obtenu au questionnaire SART	95

4.3.4	Effet du mouvement de respiration sur la réactivité des participants . . .	96
4.4	Discussion des résultats obtenus	97
4.4.1	Lien entre la capacité de projection de la conscience de situation et la performance	98
4.4.2	Impact de l'implication dans les tâches sur l'évaluation de la conscience de situation	99
4.4.3	Effet du mouvement de respiration sur l'attention	101
4.4.4	Limites de l'expérimentation mise en place	101
Conclusion	. . . . .	102

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons montré que le robot pouvait améliorer la conscience de la situation (CS) d'un humain en interaction en utilisant des gestes de communication non-verbale pendant qu'il réalise ses tâches dans un mode d'interaction de coopération. Ces gestes sont nommés mouvements de signalisation et se déclinent en deux types : les mouvements dits *d'actions*, liés à la tâche du robot, et les mouvements dits *d'état*, liés aux états du robot. Ils ont notamment permis, par leur saillance, de soutenir le modèle mental des participants et de les maintenir dans la boucle d'actions du robot.

Dans ce chapitre, nous proposons d'étudier, d'une part, le lien entre la capacité de projection (niveau 3 de la conscience de la situation (CS)) et le partage d'attention d'un humain et d'autre part, l'influence des mouvements de signalisation sur l'attention d'un humain pendant qu'il réalise des tâches seul et en coopération avec un robot. Nous souhaitons ici vérifier si les mouvements de signalisation permettent d'empêcher les individus de se trouver dans le schéma d'accident n°3 décrit dans la section 2.4.2 du chapitre 2. Pour rappel, ce schéma comportait l'apparition de trois démons de la conscience de la situation (CS) : la *tunnélisation attentionnelle*, le *syndrome hors de la boucle* et le *modèle mental errant*. Également, nous souhaitons vérifier l'hypothèse émise à la fin du chapitre 3 concernant l'effet des mouvements de signalisation dans le cas où les personnes peuvent anticiper les prochaines actions du robot.

Ce chapitre répond à la question 4 présentée en Introduction de ce manuscrit.

Question 4

Les mouvements de signalisation d'un robot permettent-ils d'extraire un humain d'un état de tunnélisation attentionnelle et d'atténuer son manque de capacité de projection dans un scénario de coopération humain-robot ?

Nous débutons ce chapitre en présentant une courte revue de la littérature qui nous a menée à notre question de recherche en section 4.1. Nous discuterons de la capacité de projection du modèle de la CS de Endsley (1995b) et de l'importance de soutenir les capacités attentionnelles dans un scénario de coopération humain-robot. Nous terminons cette section en présentant nos hypothèses théoriques. Ensuite, en section 4.2, nous détaillons la méthode expérimentale mise en place afin de vérifier nos hypothèses. Dans notre protocole expérimental, l'humain participe ponctuellement à des tâches d'assemblage faites en coopération avec un cobot situé dans le même espace de travail. En plus de cela, il est demandé aux participants de jouer au jeu des

tours de Hanoi. Cette deuxième tâche a pour but de tunnéliser leur attention sur une tâche externe au robot. Cet état a pour but de les rendre hors de la boucle des actions du robot et dégrade ainsi leur modèle mental afin de reproduire le schéma d'accident n°3 du chapitre 2. Pour attirer l'attention de l'humain, le robot génère des mouvements de respiration (*mouvements de signalisation d'état*). Ce mouvement, tel que défini dans le précédent chapitre (chapitre 3), permet au robot de donner des informations à propos de son état courant. Dans le cas présent, il permet au robot d'exprimer un état d'attente d'une action de l'humain et de l'extraire d'une potentielle situation de tunnélisation attentionnelle. L'analyse de nos résultats décrite en section 4.3 montre un effet des capacités de projection sur le comportement des participants vis-à-vis du robot ainsi que des effets de la communication non-verbale sur l'attention des participants dans un scénario de coopération. Nous discutons des résultats obtenus en section 4.4 et concluons ce chapitre en rappelant les contributions de ce travail et les perspectives qu'il propose.

4.1 Influence des capacité de projection sur le partage d'attention

4.1.1 Capacité de projection dans le modèle de la conscience de situation

Comme nous avons pu le voir dans la section 1.3 du chapitre 1 de ce manuscrit, la CS se définit comme « *la perception des éléments de l'environnement dans un volume de temps et d'espace, la compréhension de leur signification, et la projection de leur statut dans un futur proche* » (Endsley, 1995b). C'est un processus cognitif qui permet une prise de décision adéquate dans des environnements dynamique (voir figure 4.1).

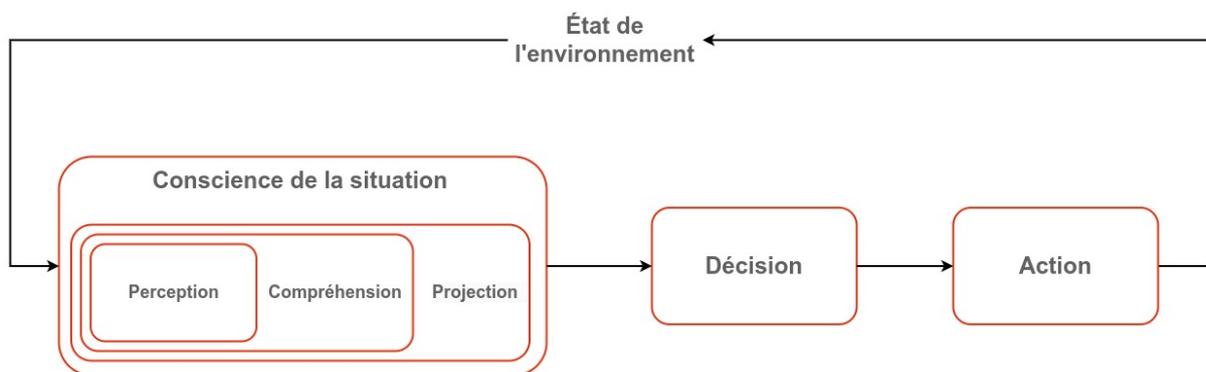


FIGURE 4.1 – Modèle simplifié de la CS à 3 niveaux de Endsley (1995b).

D'après Endsley (2016), la première étape de la construction d'une bonne CS est la perception (niveau 1 de la CS) de l'état, des attributs et de la dynamique des éléments pertinents dans l'environnement. Cette phase de perception est rendue possible grâce aux différentes modalités sensorielles de l'individu. La deuxième étape correspond à la compréhension (niveau 2 de la CS) des données et de la signification des indices pertinents perçus par rapport aux buts et objectifs prédéfinis. Elle repose sur une synthèse des éléments désordonnés du niveau 1 et une comparaison de ces informations avec les objectifs de l'individu. La dernière étape concerne la projection (niveau 3 de la CS) des états futurs des différents éléments de l'environnement. L'individu doit être capable de prévoir, au moins à court terme, l'évolution des éléments après connaissance et détermination de leur signification par rapport à l'objectif actuel. Pour atteindre le niveau 3 de la CS, un individu doit avoir une bonne compréhension de la situation et de la

dynamique du système avec lequel il interagit. Ce niveau permet une prise de décision proactive (voir figure 4.1). En se projetant constamment dans l'avenir, un expert est capable de développer un ensemble de stratégies et de réponses aux événements (Endsley, 2016). Il est important de retenir que la CS est un processus dynamique tout au long de la réalisation d'une tâche. Ainsi, améliorer la projection de l'état futur d'un élément de l'environnement de travail au temps t renforcera l'attention portée à ce même élément au temps $t+1$ si cela est nécessaire. Par exemple, si l'on projette qu'un robot va se déplacer dans un futur relativement proche, on y portera attention quand il initiera son mouvement.

La prévisibilité d'un robot, et plus généralement d'un système, est une notion que l'on retrouve dans le concept de transparence (Lyons, 2013). La transparence peut être considérée comme un moyen de parvenir à une CS partagée et à des intentions mutuelles entre des humains et un système (Alonso & De La Puente, 2018). Dans le cadre de l'IHR, la transparence est définie comme l'observabilité et la prévisibilité du comportement du système : la compréhension de ce que le système fait, pourquoi et ce qu'il fera ensuite (Endsley, 2017). On retrouve dans sa définition de nombreux points communs avec la définition de la CS :

1. la première étape correspond à la perception de l'action du robot ;
2. la seconde étape correspond à la compréhension de l'effet de l'action ;
3. la troisième étape correspond à la projection des futures actions du robot.

Les travaux présentés dans le chapitre 3 de ce manuscrit ont montré des effets bénéfiques de la communication non-verbale sur les capacités de projection des participants. Plus généralement, ils ont contribué à ce que le robot soit plus transparent à l'égard de son partenaire humain. Des mouvements *d'actions*, en lien direct avec la tâche, ont permis au robot de communiquer avec des humains à propos de la tâche en cours. Ils ont aussi informés de l'état de la tâche et maintenu les personnes en interaction avec le robot dans sa boucle d'action. Ainsi, ces derniers se sont vu plus impliqués dans la tâche de collaboration et leurs décisions sur les actions à réaliser ont été soutenues. Cela a notamment maintenu les humains dans la boucle d'actions du robot. Également, des mouvements *d'état*, en lien avec les états du robot, ont rendu les individus vigilants vis-à-vis d'un potentiel danger à s'approcher du robot. Le robot, en générant des mouvements de signalisation d'état, a alerté les participants de sa potentielle reprise d'activité. Ainsi, ces derniers se sont éloignés du robot afin d'éviter une potentielle collision en passant trop proche. Cela a notamment contribué à soutenir le modèle mental de l'humain vis-à-vis du robot.

4.1.2 Capacités attentionnelles dans la coopération humain-robot

La CS est un processus cognitif interne qui intervient dans la prise de décision et avant l'exécution d'une action dans un environnement dynamique (Endsley, 2016). De manière inhérente, la CS dépend principalement des représentations mentales de la situation perçue par l'individu (Endsley, 1995b). La prise de décision et l'exécution d'une action dans des conditions de sécurité dégradées ont souvent des conséquences négatives en termes de sécurité et de performance. Dans la plupart des cas, cela est dû à un problème de perception et, plus précisément, à une mauvaise répartition de l'attention au cours de la tâche. L'attention est définie comme « la prise de possession par l'esprit, sous une forme claire et vivante, d'un seul objet parmi ce qui semble être plusieurs objets ou courants d'idées simultanés. La focalisation, la concentration de la conscience sont de son essence. Elle implique le retrait de certaines choses

afin d'en traiter d'autres de manière efficace. » (traduit de James (2007)). Quatre types d'attentions sont distingués dans la littérature : l'attention sélective, l'attention focalisée, l'attention divisée et l'attention soutenue (Wickens, 2007). Ici, nous nous intéresserons principalement à l'attention divisée (ou attention partagée). Elle caractérise les efforts déployés pour traiter plusieurs canaux d'information ou effectuer plusieurs tâches en parallèle (Wickens, 2007, 2021).

Dans le cadre d'une coopération entre un humain et un robot, l'humain et le robot partagent le même espace de travail, au même moment et sur des tâches séparées (Bauer et al., 2016; Müller et al., 2017; Matheson et al., 2019; Kumar et al., 2020). Les deux partenaires ne travaillent pas simultanément sur le même produit ou composant. En revanche, les deux agents peuvent partager temporairement certaines de leurs ressources physiques, cognitives ou informatiques. Ce mode d'interaction implique que l'humain peut se retrouver dans des situations où il est concentré sur ses propres tâches et ne pas partager ses ressources avec le robot aux moments attendus. Également, cela implique que le robot soit autonome et dispose d'un certain degré d'automatisation pour réaliser ces actions.

Des études ont indiqué que l'automatisation intermédiaire facilite l'augmentation de la CS sans nécessairement améliorer les performances ou diminuer la charge de travail (Kaber & Endsley, 2004). Il a également été soutenu que l'augmentation du degré d'automatisation aurait aussi pour effet de diminuer la conscience qu'ont les participants humains des actions de leur équipe (Endsley, 2016; Gombolay et al., 2017). En termes de métriques physiologiques, il a été observé par des mesures de variabilité du rythme cardiaque que l'augmentation de l'assistance du robot réduisait l'approvisionnement attentionnel et l'engagement dans la tâche des participants (Hopko et al., 2021). Cela pourrait notamment amener les personnes à un état de tunnélisation attentionnelle et de situation hors de la boucle des actions du robot qui travaille indépendamment de son partenaire humain.

4.1.3 Hypothèses théoriques

Pour répondre à la question 4, nous proposons les trois hypothèses suivantes à partir de la littérature et du chapitre précédent :

Hypothèse 4.1

La capacité de projeter l'action ultérieure d'un robot améliore la réactivité des individus dans les tâches faites en coopération.

Cette hypothèse se base sur nos travaux présentés dans le chapitre 3. Il avait été montré que la performance à une tâche de collaboration était meilleure lorsque le robot soutenait la capacité du participant à projeter les prochaines actions du robot. Nous supposons que si un humain est capable de projeter les prochaines actions du robot, alors il aura tendance à y porter plus régulièrement son attention et ainsi à être plus réactif s'il doit intervenir dans l'action.

Hypothèse 4.2

Les individus possèdent une meilleure conscience de situation lorsqu'ils sont impliqués dans un plus grand nombre de tâches en coopération avec un robot.

Cette hypothèse est basée sur les travaux de Hopko et al. (2021), qui ont montré que l'augmentation de l'assistance robotique réduisait la CS d'une personne. Dans le présent travail, il a été supposé que l'implication de l'humain dans un plus grand nombre de tâches le réintroduirait dans la boucle, et que sa CS serait donc meilleure. Notamment, nous nous attendons à ce que le modèle mental du participant soit correctement soutenu pour qu'il puisse convenablement réaliser ses tâches.

Hypothèse 4.3

Les individus portent plus rapidement leur attention vers le robot lorsqu'il génère un mouvement d'attente plutôt que lorsqu'il reste immobile.

Cette hypothèse est également liée aux travaux du chapitre 3, dans lesquels les mouvements de communication non-verbale liées à la tâche ont amélioré la CS des participants. Ici, il s'agit de vérifier la saillance du mouvements de signalisation de respiration dans le but de dé-tunnéliser les participants.

4.2 Méthode expérimentale

4.2.1 Contexte de l'expérimentation

Cette expérimentation a été conçue conformément aux contraintes liées au cas d'usage du projet ANR Pacbot qui finance le travail de cette thèse. Comme expliqué en Introduction du manuscrit, le cas d'usage de l'ANR concerne l'introduction de robots collaboratifs dans des boîtes à gants de chimie dans le but d'assister les chimistes dans leurs tâches. Une boîte à gants est un environnement particulièrement contraint dans lequel l'interaction entre un humain et un robot peut y être difficile.

Nous avons imaginé un type de tâche dans lequel l'humain procède à des manipulations seul, sans interaction avec le robot. Cette tâche nécessite une forte demande au niveau des ressources cognitives et attentionnelles de la personne. Cela nous permet de plonger le participant dans une situation de tunnélisation attentionnelle. En plus de cela, il doit ponctuellement porter son attention vers le robot collaboratif pour l'assister dans une tâche réalisée en coopération. Quand il participe à cette tâche, l'humain peut effectuer des actions prévisibles et d'autres qui ne le sont pas. Ces actions qu'il ne peut pas prévoir le conduisent à être dans une situation hors de la boucle.

Afin d'alerter sur son besoin d'assistance, le robot effectue un mouvement de *respiration*. Le choix de ce mouvement est fait en prenant en compte que le robot pourrait tenir dans sa pince un procédé chimique ne devant pas être déplacé afin d'éviter de le renverser, par exemple. La respiration est conçue de manière à ce que l'organe terminale du robot reste géométriquement fixe dans l'espace. En utilisant le principe de la redondance articulaire (voir section 3.1.2), le robot peut maintenir la position de son organe terminal tout en déplaçant les articulations nécessaires à la génération du mouvement de respiration.

4.2.2 Participants

Vingt-huit volontaires (10 femmes et 18 hommes) ont été recrutés pour l'expérience sur un campus universitaire à l'aide de listes de courrier électronique et de réseaux sociaux. Ils étaient âgés de 18 à 38 ans ($M = 22.77$, $SD = 3.89$) et n'étaient pas familiarisés avec la tâche. Deux participants n'ont pas pu terminer l'expérience en raison de problèmes techniques. Les résultats ont été analysés sur les 26 participants restants. L'expérience a été réalisée avec l'accord d'un comité d'éthique (COERLE¹, autorisation n°2023-05). Tous les participants ont rempli un formulaire de consentement pour prendre part à l'expérience et utiliser leurs données pour l'analyse de ce travail. Deux ordres de passage ont été mis en place pour éviter tout biais potentiel et les participants ont reçu un numéro aléatoire, chacun associé à l'un des deux ordres.

4.2.3 Tâches accomplies pendant l'expérimentation

Deux tâches principales doivent être accomplies par l'équipe humain-robot au cours de l'expérience. Le but de notre expérience est d'amener l'humain et le robot à coopérer sur une tâche à des moments pouvant ou ne pouvant pas être anticipés, pendant que l'humain effectue une tâche à forte intensité cognitive. Ces tâches sont conçues de manière à être fidèles à des tâches rencontrées dans des environnements industriels. Les différentes tâches de chacun des individus et leurs conditions de réalisation sont représentées dans la figure 4.2.

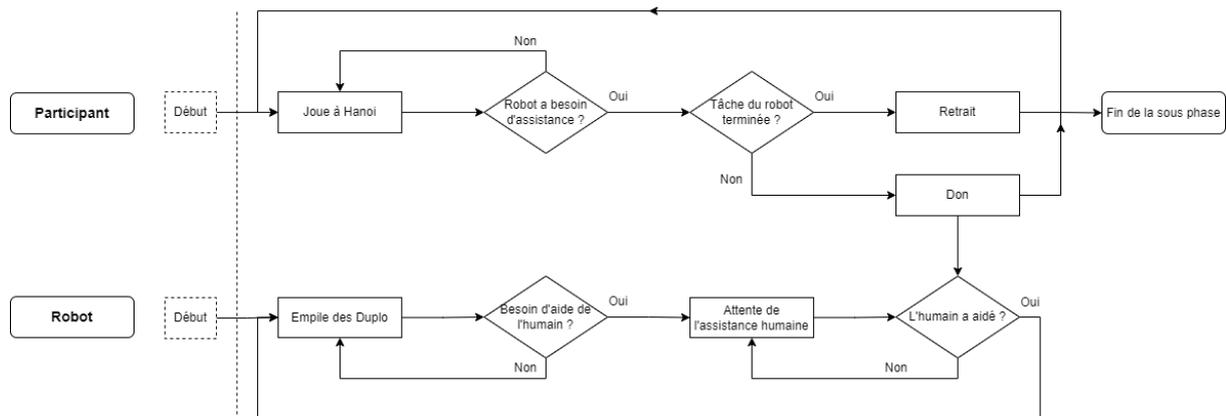


FIGURE 4.2 – Diagramme des tâches de l'humain et du robot au cours de chaque phase. L'humain doit terminer le jeu de la Tour de Hanoï, sauf si le robot a besoin d'assistance. Si c'est le cas, l'humain doit soit donner une pièce, soit retirer les constructions, selon que le robot a terminé ou non sa tâche. Le robot doit empiler des Duplo en continu jusqu'à ce qu'il ait besoin de l'assistance d'un humain. Le robot reste en attente jusqu'à ce que l'humain ait apporté son aide. Le robot peut alors reprendre sa tâche.

4.2.3.1 Jeu des Tours de Hanoï

La première tâche consiste à terminer le plus de fois possible le jeu des Tours de Hanoï. Ce jeu est reconnu comme un test des fonctions exécutives, en particulier la capacité de résolution de problèmes (Simon, 1975). De par sa nature, cette tâche requiert un niveau élevé de concentration et d'attention pour être accomplie. Elle consiste à déplacer des disques de différentes tailles d'une tour de départ à une tour d'arrivée, en respectant deux règles : (i) un seul disque peut être déplacé à la fois et (ii) un disque plus grand ne peut pas être empilé sur un plus petit.

1. <https://www.inria.fr/fr/comite-operationnel-devaluation-des-risques-legaux-et-et-hiques>

Cette tâche est exclusivement réalisée par le participant et lui est présentée comme sa tâche principale. Elle a pour but de détourner l'attention du participant de l'environnement de travail et de le tunnéliser. À cette fin, les participants sont invités à s'engager dans le jeu des Tours de Hanoï de manière répétée, afin de garantir un engagement continu tout au long de chaque phase expérimentale. Cette approche est adoptée pour éviter un scénario dans lequel les participants acquièrent rapidement l'algorithme de résolution ou se familiarisent avec la tâche, ce qui leur laisse un temps d'inactivité une fois la tâche terminée. Ainsi, il est garanti que la majeure partie de l'attention des participants se concentre sur le jeu des Tours de Hanoï.

4.2.3.2 Tâche de construction de coopération

La deuxième tâche consiste à construire trois piles de quatre Duplo chacune. Cette tâche est réalisée conjointement par le robot et le participant. Le rôle du robot est de construire les piles et le participant doit assister le robot. L'assistance du robot peut se faire de deux manières, soit par un don d'un Duplo, soit par un retrait des Duplo de la plaque.

Don - S'il n'y a plus de Duplo de la couleur souhaitée dans la réserve du robot, le participant doit lui en donner un - rangé dans une boîte de stockage - en le plaçant dans le carré de la zone de partage (voir figure 4.3). L'action de remise ne peut pas être anticipée, car la personne n'a pas accès au modèle des piles que le robot doit faire. Par conséquent, l'humain est exclu de la boucle de la tâche du robot et sa capacité de projection (niveau 3 de la CS) est entravée. Les dons sont répartis de manière aléatoires contrôlés et différents entre les phases.

Retrait - Une fois que le robot a fini de construire trois piles de quatre Duplo, un message d'écran informant le participant s'affiche (voir figure 4.4). Il doit ensuite retirer les piles du plateau et ranger les Duplo dans la réserve du robot en suivant le modèle affiché à l'écran. Les Duplo qui ne sont pas rangés dans la réserve du robot doivent être rangés dans la boîte de stock de l'humain. L'action de retrait peut être anticipée car le nombre et la taille des piles sont toujours les mêmes tout au long des phases et sont connus du participant. Dans ce cas, la boucle de CS n'est pas entravée.

Le robot adopte une position d'attente au-dessus du plateau de Duplo pendant qu'il attend une intervention de l'humain. Lorsque le robot attend une assistance, il se tient au-dessus de la planche avec sa pince légèrement tournée vers l'humain. Lorsqu'il atteint sa position d'attente, le robot commence à communiquer non verbalement son état d'attente. Il peut soit rester immobile, soit effectuer un mouvement de signalisation. Ce mouvement symbolise la respiration et a été testé pour indiquer aux participants que le robot était actif et pouvait reprendre son activité à tout moment (voir chapitre 3). Dans le cas présent, il indique que le robot est en attente d'une action de l'humain.

La consigne générale donnée est de réaliser le plus grand nombre possible de Tour de Hanoï, tout en faisant en sorte que le robot attende le moins longtemps possible. Ceci est présenté comme une contrainte de performance pour l'accomplissement de la tâche, telle qu'elle peut être rencontrée dans un environnement écologique.

4.2.4 Matériel et dispositif expérimental

Les deux tâches sont réalisées sur une même table de travail. Un jeu des Tour de Hanoï composé de trois piquets et de cinq disques est placé sur le côté gauche de la table.

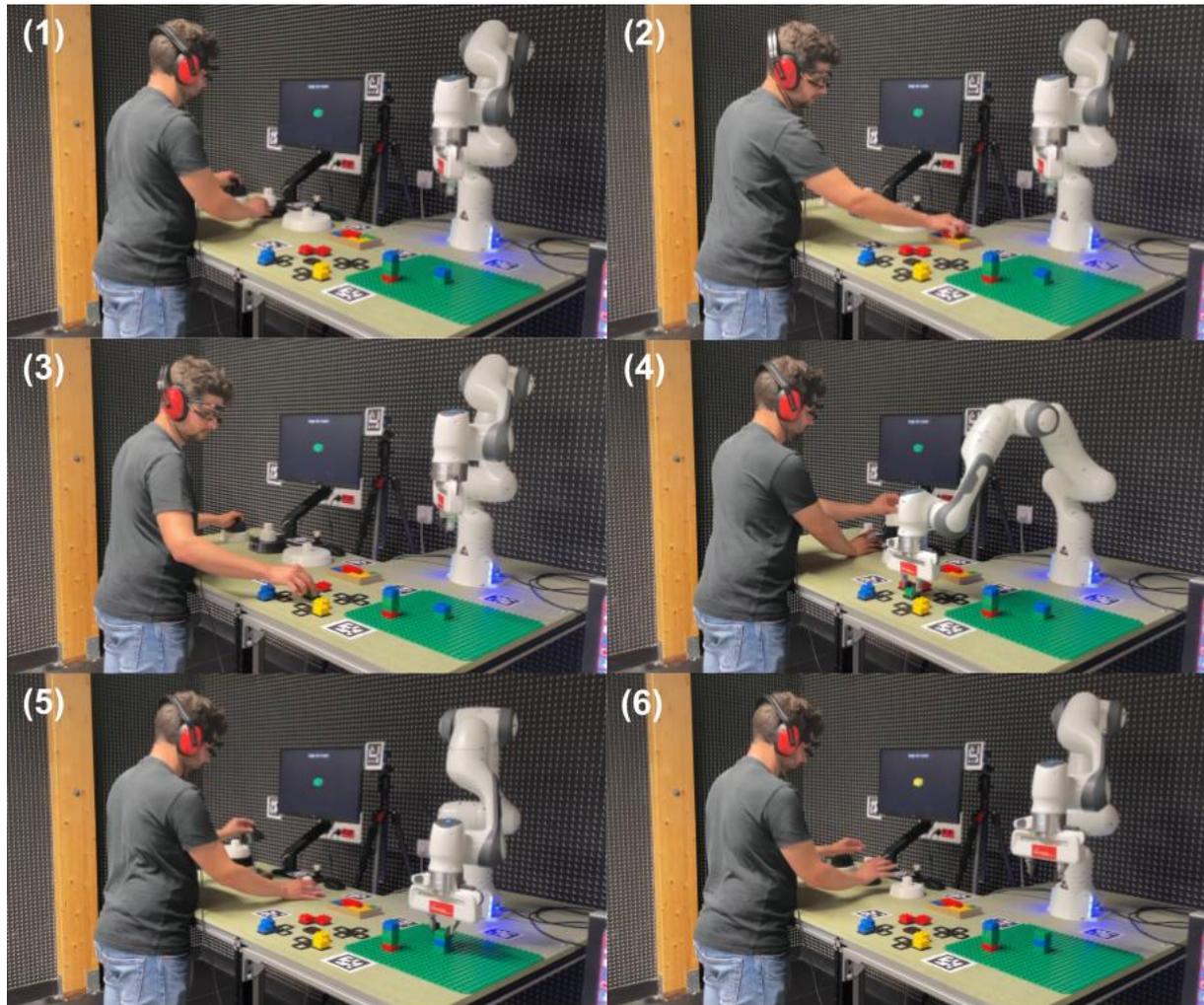


FIGURE 4.3 – Exemple d’une séquence de don. (1) Le robot attend une assistance pendant que l’humain joue au jeu des tours de Hanoi ; (2) l’humain prend un Duplo de la couleur désirée (verte) dans la boîte de rangement ; (3) l’humain place le Duplo dans la case de partage ; (4) le robot attrape le Duplo ; (5) le robot empile le Duplo sur la construction en cours ; (6) le robot n’a plus besoin d’assistance.

Un cobot Panda (Franka Emika¹) et le plateau sur lequel il construit les tours de Duplo se trouvent sur le côté droit de la table. La réserve des Duplo manipulés par le robot sont placés au centre droit de la table, regroupés par couleur. Une zone carrée pour le don est située au centre de la réserve. Une boîte de rangement est également placée au centre de la table pour stocker les Duplo supplémentaires après un retrait (voir figure 4.6).

Des lunettes Pupil Core (Pupil Labs²). C’est un outil de suivi oculaire composé d’une suite logicielle libre et de lunettes de suivi oculaire portables. (voir figure 4.5). Elles ont été utilisées pour collecter des données de suivi oculaire et fournir des données objectives relatives à la CS des participants.

Un écran permet d’afficher des informations sur l’expérience et de calibrer le Pupil Core. Tout au long de l’expérience, l’écran affiche le Duplo que le robot souhaite empiler. L’écran a été placé de manière à ce que l’opérateur doive lever les yeux pour le voir. En outre, la luminosité et l’affichage de l’image ont été réduits au minimum, afin d’éviter que les participants ne soient

1. <https://robodk.com/robot/Franka/Emika-Panda>
 2. <https://pupil-labs.com/products/core/>

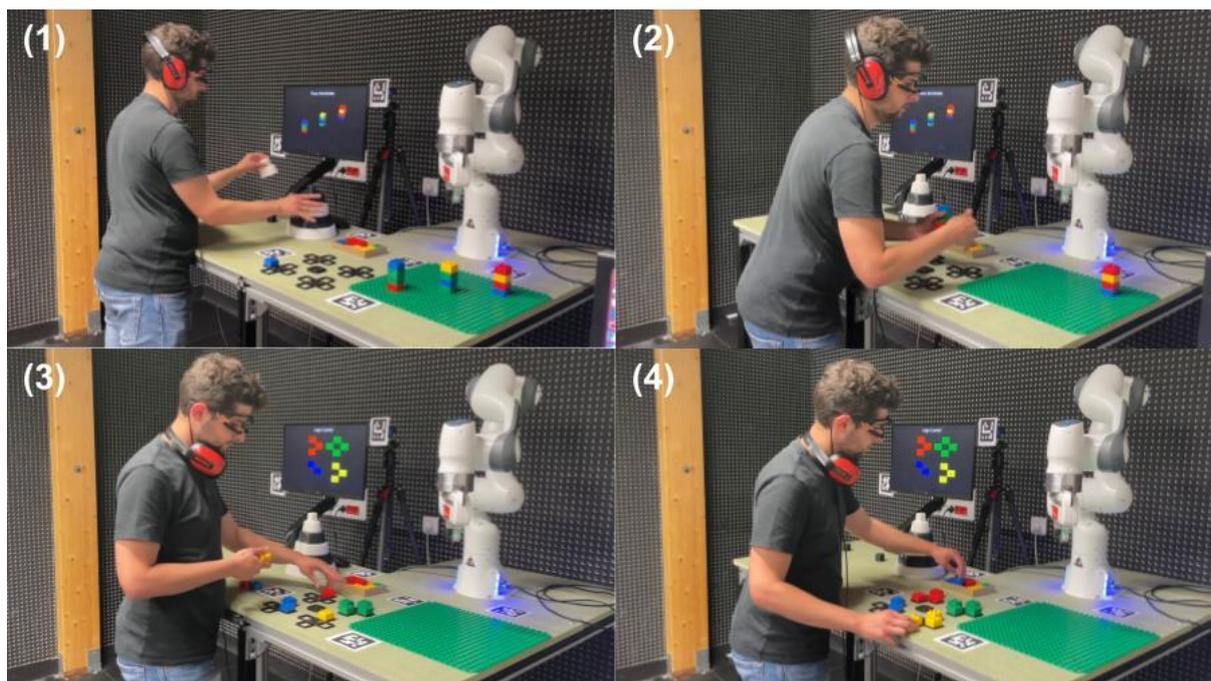


FIGURE 4.4 – Exemple d’une séquence de retrait. (1) Le robot attend un retrait pendant que l’humain joue au jeu de Hanoi ; (2) l’humain retire les Duplo de la plaque ; (3) l’humain range les Duplo dans la réserve du robot ; (4) l’humain range les Duplo restants dans sa boîte de rangement.

flashés pendant leur tâche. L’écran change à chaque fois que le robot place un Duplo, annonçant le prochain Duplo souhaité (voir figure 4.3).

Un casque anti-bruit est utilisé pour s’assurer que les participants n’entendent pas et n’utilisent pas le bruit des moteurs du robot comme source d’information. Cela nous permet notamment de nous assurer que ce sont bien les mouvements du robot qui attirent l’attention des participants et non le bruit, ou l’absence de bruit, du robot. Les participants ont porté le casque antibruit pendant toute la durée des phases, ne l’enlevant qu’après le deuxième retrait de chaque phase (c’est-à-dire à la fin de la phase). Cela permettait à l’expérimentateur de présenter les instructions pour la phase suivante et de demander au participant de remplir des questionnaires.

Deux questionnaires doivent être remplis par les participants à la fin de chaque phase de l’expérience :

- Le Situation Awareness Rating Technique (SART) (Taylor, 2017) qui évalue la CS de manière subjective (voir annexe A). Il est composé de 10 questions qui évaluent trois dimensions de processus cognitif impliqué dans la tâche : la demande attentionnelle, la réserve attentionnelle et la compréhension. Chaque question est évaluée à l’aide d’une échelle de Likert à sept niveaux de précision, et un score global d’CS est ensuite calculé.
- Le RAW-TLX (Hart, 2006) qui mesure la charge de travail perçue des participants (voir annexe B). Il se compose de six échelles de Likert à 21 niveaux de précision. Les trois premières questions évaluent les contraintes de la tâche : demande mentale, demande physique et pression temporelle. Les trois dernières se concentrent sur les capacités de l’utilisateur : performance, effort et frustration. L’utilisation du RAW-TLX est une autre source d’aide pour tromper le participant sur la véritable nature de l’expérience.

Deux ordinateurs sont utilisés pour la mise en place de l’expérience. Le premier sert à lancer



FIGURE 4.5 – Lunettes Pupil Core de Pupil Labs.

l'expérience, à administrer les questionnaires et à enregistrer les données de suivi oculaire et les enregistrements du robot. Le second ordinateur est relié au premier et sert à contrôler le robot. Ces ordinateurs sont placés derrière le sujet sur le bureau de l'expérimentateur. Pour des raisons techniques et pour mener à bien l'expérience, l'expérimentateur doit être présent dans la pièce. Enfin, pour des raisons de sécurité, un bouton d'arrêt d'urgence du robot est placé sur le bureau de l'expérimentateur.

4.2.5 Déroulement de l'expérimentation

L'expérimentateur accueille le participant et lui présente le déroulement de la session expérimentale. Les phases sont expliquées de manière à ce que le participant croie que l'expérimentateur va évaluer sa capacité à réaliser le jeu des Tours de Hanoï dans différentes conditions de charge de travail. Après cela, le participant remplit un formulaire de consentement. Ensuite, l'expérimentateur ajuste le système de suivi oculaire au visage du participant et règle les caméras pupillaires. Les participants ne savent pas que le système de suivi oculaire mesure leur CS. L'expérimentateur leur dit seulement qu'il permet de mesurer physiologiquement leur charge de travail (dilatation de la pupille).

L'expérience est divisée en trois phases distinctes et une phase d'entraînement (voir figure 4.7). Chaque phase commence par une explication des instructions afin de s'assurer que le participant a bien compris les tâches à effectuer. L'expérimentateur calibre le système de suivi oculaire après les explications et l'évaluation commence alors.

Pendant la phase d'entraînement, les participants doivent compléter autant de tours de Hanoï que possible en 7 minutes. Cette phase dure autant que chacune des phases suivantes et a été déterminée lors d'un pré-test de l'expérience. Elle nous permet d'entraîner les participants à jouer au jeu des tours de Hanoï et de vérifier la qualité des mesures de le système de suivi oculaire. Le robot reste inactif pendant toute cette phase. Au cours des phases suivantes, les participants doivent toujours compléter le plus grand nombre possible de tours de Hanoï.

A partir de la première phase, le robot effectue la tâche de construction. Au cours de cette

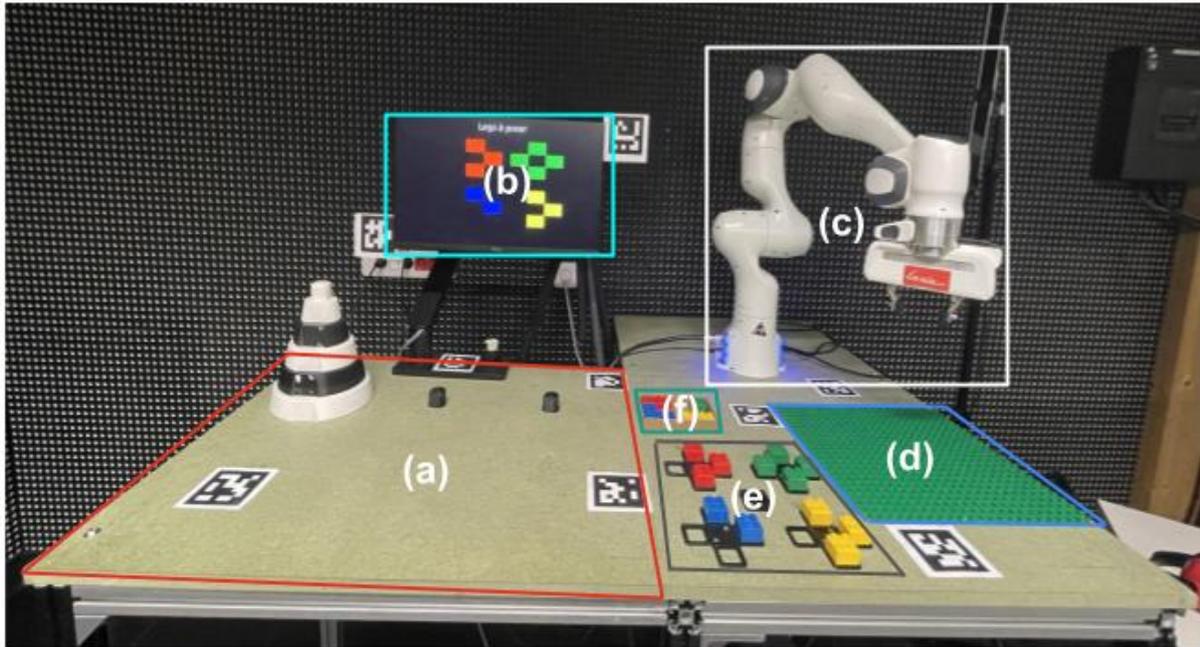


FIGURE 4.6 – Dispositif expérimental. (a) Zone des participants et du jeu de Hanoï en rouge ; (b) zone de l'écran en cyan ; (c) zone du cobot en blanc ; (d) zone du plateau de Duplo en bleu ; (e) zone de la réserve et du carré de partage en gris ; (f) zone de la boîte de stock en vert.

phase, les participants doivent à la fois superviser et assister le robot tout en jouant au jeu des Tour de Hanoï. Au total, pour cette phase et les suivantes, le robot construit deux fois trois tours de quatre Duplo chacune. À la fin de cette phase et des suivantes, les participants sont invités à remplir les questionnaires SART et RAW-TLX. **Superviser** le robot consiste à vérifier que le robot attrape une Duplo de la couleur affichée à l'écran. Pour s'assurer qu'il supervise correctement le robot, le participant est invité à communiquer verbalement la couleur affichée à l'écran et la couleur attrapée par le robot (exemple : vert - vert).

Au cours des deuxième et troisième phases, les participants doivent uniquement assister le robot. La différence entre ces deux phases réside dans la manière dont le robot attend l'assistance de l'humain. Le cobot peut attendre l'intervention de l'humain en restant immobile ou en effectuant un mouvement de respiration. L'ordre de ces deux phases dépend de l'ordre initialement attribué au participant : s'il appartient à l'ordre n°1, le robot effectue le mouvement de respiration dans la phase n°2 et reste immobile dans la phase n°3, et vice versa pour l'ordre n°2.

Il y a deux dons et deux retraits par phase. Les mesures sont interrompues entre le premier retrait et la reprise du robot une fois que les participants ont correctement remplacé tous les Duplo.

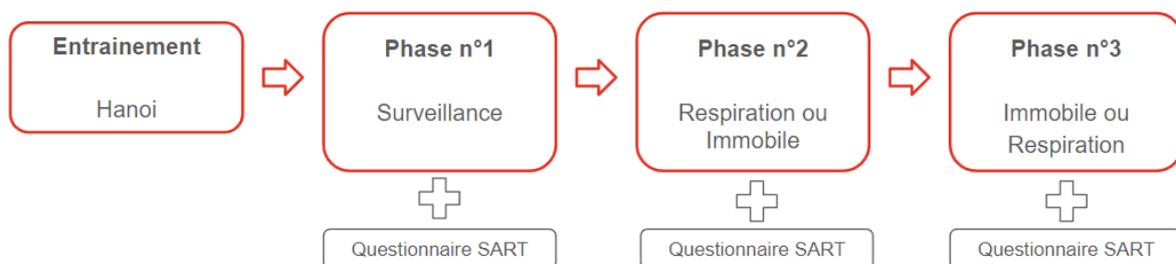


FIGURE 4.7 – Déroulé de la deuxième expérimentation pour chaque participant.

4.2.6 Variables indépendantes étudiées

Trois variables indépendantes sont manipulées au cours de l'expérience. L'ordre, qui est une variable inter-participants, et la modalité et l'action, qui sont des variables intra-participants.

4.2.6.1 Ordre de passage

Ordre {*Ordre n°1, Ordre n°2*}. Cette variable est utilisée pour atténuer les effets de l'ordre. Le contrebalancement a été effectué avant les essais expérimentaux en associant des numéros aléatoires à l'un des deux ordres. Un numéro aléatoire est alors tiré par le participant au début de son passage.

4.2.6.2 Modalités expérimentale

La Modalité {*Surveillance, Respiration, Immobile*}. Cette variable correspond au nom des trois phases selon l'ordre des participants présenté dans la section Procédure expérimentale.

La modalité *Surveillance* nous permet d'évaluer l'attention des participants dans une situation où la consigne était de prêter attention à davantage d'élément de l'environnement de travail. Cela nous a permis d'avoir un niveau de référence pour chaque participant dans le cas où ils seraient efficaces et attentifs dans les phases suivantes.

La modalité *Respiration* nous permet de vérifier si l'utilisation d'un mouvement de communication non-verbale a une influence positive sur la CS et l'attention des participants. La modalité *Immobile* sert de référence à la modalité *Respiration* pour évaluer l'effet du mouvement.

4.2.6.3 Actions à effectuer

L'action {*Don, Retrait*}. Cette variable correspond à l'action que le participant doit effectuer lorsque le robot attend une intervention. Pour chaque phase, il y a deux prises en charge et deux retraits.

L'action de *don* nous permet d'évaluer le cas où le participant ne peut pas prévoir l'action suivante du robot. L'action de *retrait* est utilisée comme référence pour évaluer l'effet de la projection car elle peut être prédite par le participant.

4.2.7 Variables dépendantes mesurées

Des données objectives et subjectives sont enregistrées au cours de l'expérience à partir de la phase de suivi. Les données objectives sont obtenues à l'aide des logs récupérés par le robot au cours de chaque phase et à l'aide du dispositif de suivi oculaire. Les données subjectives sont recueillies à l'aide des questionnaires remplis après chaque phase.

Le temps d'attente du robot - Cette mesure peut être exprimée de deux manières, soit comme le temps d'attente pour un don, soit comme le temps d'attente pour un retrait. Elle est calculée en prenant la différence entre le moment où le robot passe en mode d'attente et le moment où l'humain intervient. Étant donné qu'il y a deux dons et deux retraits par phase, les temps d'attente pour les deux ont été additionnés indépendamment. Un temps d'attente du robot élevé est synonyme d'une moins bonne performance et d'une moins bonne performance et d'une potentielle tunnélisation attentionnelle.

Le taux de regard dans chaque surface - L'espace de travail a été divisé en deux surfaces d'intérêt. La première comprenait tout le côté gauche de la table de travail (a et b) de la figure 4.6. La seconde comprenait tout le côté droit de la table de travail (c à f). Le taux de regard est obtenu en calculant la fréquence d'observation dans chacune des deux surfaces d'intérêt. Le taux de regard mesure la division de l'attention des participants. Les deux valeurs sont complémentaires et leurs sommes sont égales à 1. Ainsi, un taux de regard trop faible dans la surface du robot peut-être lié à une concentration trop forte sur le jeu des tours de Hanoï et peut impliquer une performance moindre pour donner ou retirer les Duplos.

Le score SART - Il est calculé à partir des réponses des participants en utilisant la méthode proposée par Taylor (2017). Un score élevé indique que le participant s'auto-évalue d'une haute CS au cours de la tâche. Cela requiert qu'il évalue avoir une haute compréhension de la situation, une haute réserve attentionnelle CS et une faible demande attentionnelle.

4.2.8 Hypothèses opérationnelles

Conformément aux hypothèses théoriques définies en section 4.1, nous définissons quatre hypothèses opérationnelles. L'hypothèse H2 est divisée en deux sous-hypothèses (H2.1 et H2.2). La première est testée à l'aide de la mesure du taux de regard et la seconde à l'aide des scores SART. De cette manière, l'hypothèse H2 est testée d'un point de vue à la fois objectif et subjectif.

- **H1** : Le temps d'attente du robot sera plus court lorsque le participant doit effectuer un Retrait que lorsqu'il doit effectuer un Don, quelle que soit la phase.
- **H2.1** : Les participants auront un taux de regard plus élevé dans la surface du Robot pendant la phase de Surveillance que pendant les phases Immobile et Respiration.
- **H2.2** : Les participants obtiendront un score plus élevé au questionnaire SART après la phase de Surveillance par rapport aux phases Respiration et Immobile. En outre, nous nous attendons à ce que les participants obtiennent un score plus élevé au questionnaire SART pendant la phase Respiration que pendant la phase Immobile.
- **H3** : Le temps d'attente du robot sera plus court s'il attend en respirant plutôt qu'en restant immobile. Plus précisément, les temps d'attente devraient être plus courts dans la phase Respiration que dans la phase Immobile.

4.3 Analyse des résultats

Tous les résultats ont été considérés comme significatifs au niveau de confiance de 95% (c'est-à-dire une valeur $p < 0.05$). Le logiciel Rstudio (version R 4.3.1) a été utilisé pour effectuer l'analyse statistique.

Pour chaque test statistique, nous avons d'abord vérifié la condition de normalité à l'aide d'un test de Shapiro-Wilk. Les distributions suivent une loi normale pour le score au questionnaire SART ($p = .535$), mais pas pour les temps d'attente du robot ($p < .001$) ni pour le taux de regard ($p < .001$). L'homogénéité des variances des scores SART a également été vérifiée à l'aide d'un test de Levene ($p = .988$). Comme les conditions de normalité et d'homogénéité des variances sont respectées, nous avons pu utiliser l'ANOVA pour analyser les résultats du questionnaire SART. Pour les temps d'attente des robots et les taux de regard, des tests de Friedman en fonction de l'action ou de la modalité ont été effectués pour analyser les résultats. Comme il n'existe pas d'alternative non paramétrique à l'ANOVA avec au moins deux facteurs, nous

avons effectué nos calculs en utilisant la version paramétrique de l'ANOVA pour analyser les temps d'attente en fonction de la Modalité et de l'Action. Cela nous a aussi permis d'étudier s'il existait un effet d'interaction entre les deux variables.

4.3.1 Effet de l'ordre de passage de l'expérimentation

L'effet de l'ordre a été examiné malgré le contrebalancement. Pour ce faire, des ANOVA mixtes 2 x 3 ont été réalisées avec l'ordre (variable inter-participant) et la modalité (variable intra-participant). La sphéricité a été testée pour chacune de nos variables dépendantes. Tous les tests de sphéricité étaient significatifs ($p < .05$), ce qui signifie que la condition n'était pas remplie. Une correction de Greenhouse-Geisser a été appliquée pour chaque ANOVA. Aucun effet d'ordre n'a été trouvé pour le temps d'attente du robot ($F(1.17, 27.97) = 0.155, p = .735$), le taux de regard pour la surface de l'humain ($F(1.2, 28.77) = 0.310, p = .623$), le taux de regard pour la surface du robot ($F(1.2, 28.77) = 0.310, p = .623$), et le score SART ($F(1.56, 37.54) = 1.955, p = .164$). L'hypothèse d'un effet de l'Ordre sur nos différentes mesures n'est donc pas confirmée. Dans la suite du chapitre, les données seront comparées sans tenir compte de la variable Ordre.

4.3.2 Effet de la capacité de projection sur le temps d'attente du robot

Nous avons calculé un test de Wilcoxon pour mesurer l'effet du type d'action sur le temps d'attente du robot. Ce test a révélé que les temps d'attente pour un don étaient plus longs (Mdn = 16.91) que pour un retrait (Mdn = 4.29), $Z = 14.2, p < 0.001$. Ces résultats confirment l'hypothèse H1. Indépendamment de la modalité expérimentale, les participants ont généralement fait moins attendre le robot lorsqu'ils devaient retirer les Duplo (voir figure 4.8).

4.3.3 Effet de l'implication dans les tâches sur la conscience de situation des participants

4.3.3.1 Effet de l'implication dans les tâches sur le taux de regards

Nous avons effectué un test de Wilcoxon pour évaluer les différences entre les taux de regard sur la surface de l'humain et sur la surface du robot. Le test a révélé des différences significatives ($Z = 3081, p < .001$) entre les deux taux de regards. Plus précisément, les participants ont eu tendance à regarder plus souvent leur surface (Mdn = 0.939) que la surface du robot (Mdn = 0.061).

Par la suite, un test de Friedman a été effectué pour évaluer l'effet de la modalité sur les taux de regard dans la surface de l'humain et du robot. Le test a révélé un effet significatif ($\chi^2(2) = 21, p < .001$) du taux de regards des participants dans la surface de l'humain par rapport à la surface du robot.

Les comparaisons multiples post hoc utilisant une correction de Bonferroni ont montré que les taux de regard des participants étaient plus élevés dans leur surface dans les phases Respiration (Mdn = 0.953) et Immobile (Mdn = 0.958) que dans la phase Surveillance (Mdn = 0.898), respectivement $Z = 0.048, p < .001$ et $Z = -0.053, p < .001$.

Par ailleurs, les taux de regard étaient plus élevés sur la surface du robot dans la phase Surveillance (Mdn = 0.102) que dans les phases Respiration (Mdn = 0.047) et Immobile (Mdn = 0.042), respectivement $Z = -0.048, p < .001$ et $Z = 0.053, p < .001$.

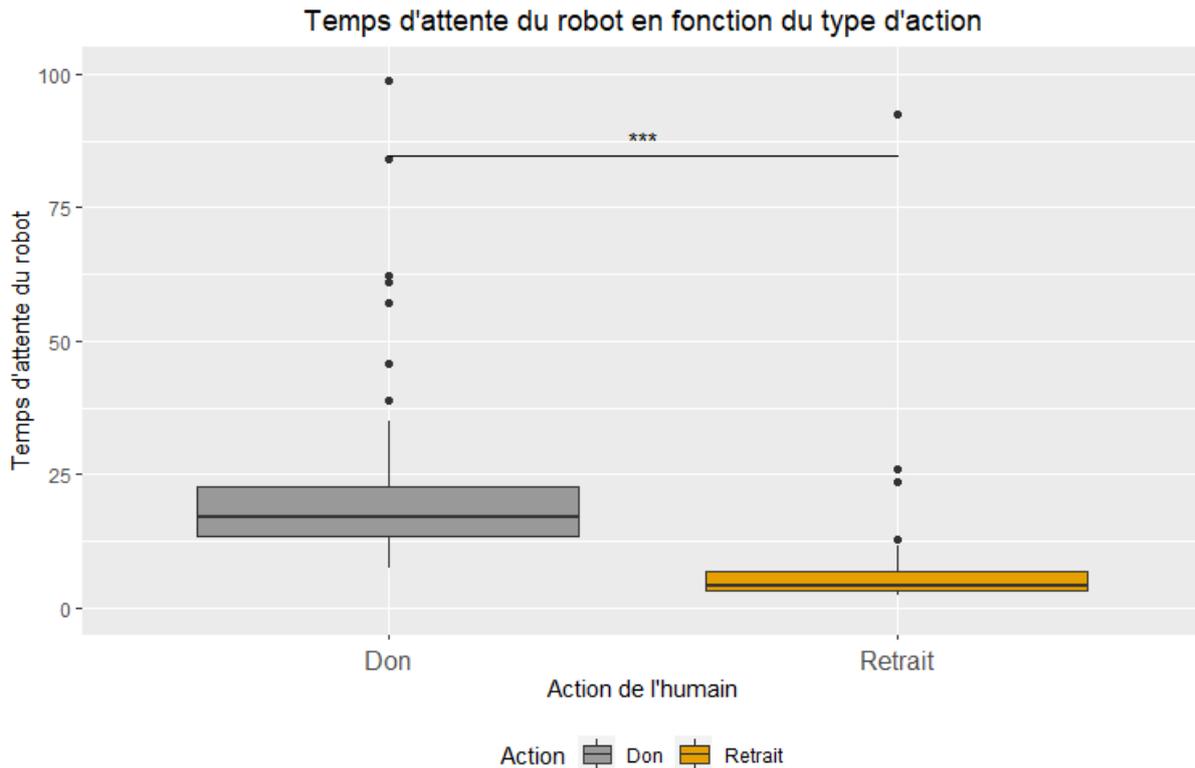


FIGURE 4.8 – Diagramme en boîte des temps d’attente mesurés pour chaque action. Le don est en gris à gauche et l’enlèvement en orange à droite. Le temps d’attente moyen pour les dons était de 21.84 secondes (écart-type = 15.48) et de 6.68 secondes (écart-type = 10.58) pour les retraits. La médiane des prises en charge était de 16.91 secondes et de 4.29 secondes pour les retraits. Les temps d’attente pour les dons étaient compris entre 7.45s et 98.78s et entre 2.54s et 92.37s pour les retraits.

Enfin, il n’y a pas d’effet d’interaction significatif sur le taux de regards entre les modalités Respiration et Immobile pour la surface de l’humain, $Z = -0.004$, $p = 1.00$, et la surface du robot, $Z = 0.004$, $p = 1.00$.

L’ensemble de ces résultats soutiennent la validation de l’hypothèse H2.1.

4.3.3.2 Effet de l’implication dans les tâches sur le score obtenu au questionnaire SART

Pour tester l’hypothèse H2.2, nous avons effectué une ANOVA à mesures répétées et n’avons trouvé aucune différence statistiquement significative entre les modalités sur le score SART ($F(2, 50) = 1.825$, $p = 0.172$). Ces résultats ne confirment pas l’hypothèse d’une meilleure CS dans la phase Surveillance ($M = 20.9$, $SD = 6.43$) plutôt que dans la phase Immobile ($M = 23.3$, $SD = 6.55$) ou la phase Respiration ($M = 22.6$, $SD = 6.48$) et même entre les deux dernières.

Un test de corrélation a aussi été calculé afin de vérifier si il y avait un lien entre nos mesures objectives et nos mesures subjectives. Le test n’a pas mis en évidence de corrélation significative entre le score SART et les temps de don ($p > 0.05$), les temps de retrait ($p > 0.05$) et les taux de regard ($p > 0.05$) (voir le tableau 4.1).

Ces résultats infirment l’hypothèse H2.2 selon laquelle les participants s’attribuent une meilleure CS lorsqu’ils sont plus impliqués dans la tâche.

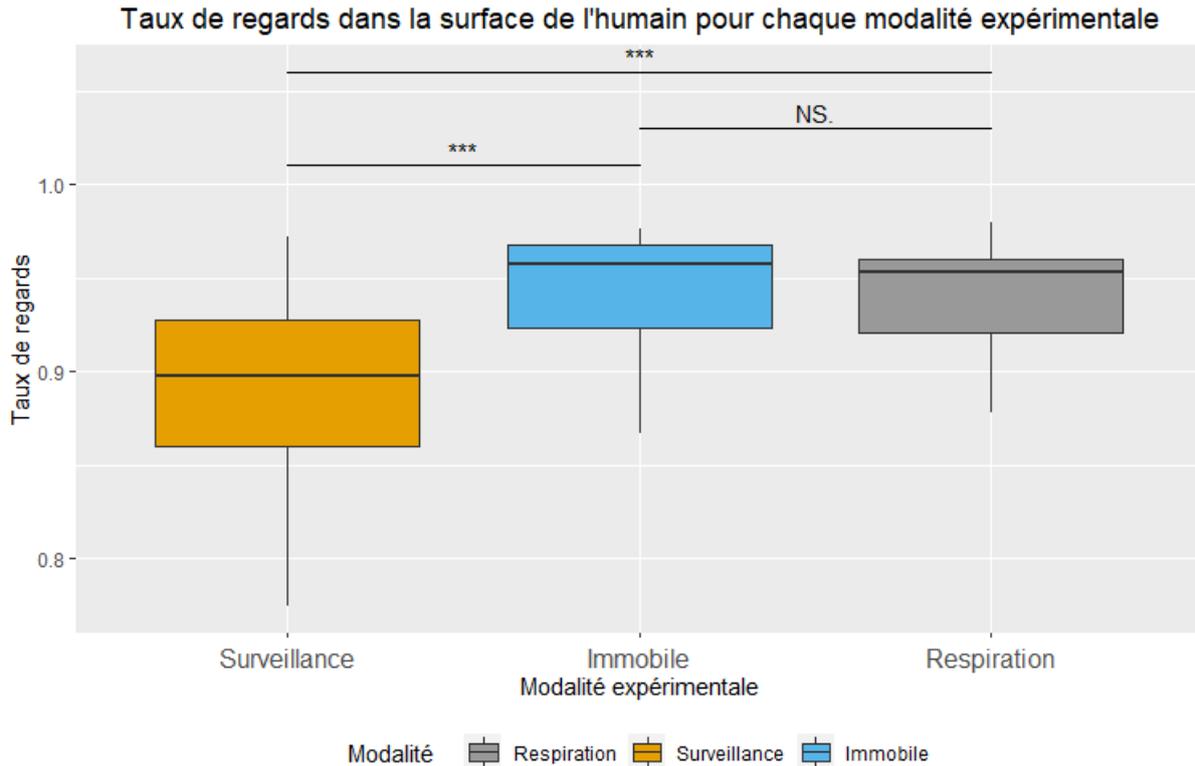


FIGURE 4.9 – Diagramme en boîte des taux de regard mesurés à l’intérieur de la surface d’intérêt humaine pour chaque modalité. Surveillance à gauche en orange, Immobile au centre en bleu et respiration à droite en gris.

4.3.4 Effet du mouvement de respiration sur la réactivité des participants

Une ANOVA (3 x 2) à mesures répétées a été calculée pour étudier l’effet de l’action et de la modalité sur le temps d’attente du robot. L’ANOVA n’a pas montré d’interaction entre la Modalité et l’Action sur le temps ($F(2, 50) = 2.426, p = .0987$). Comme il n’y avait pas d’effet d’interaction entre la Modalité et l’Action, les résultats ont été analysés séparément à l’aide de tests non paramétriques.

Un test de Friedman a été calculé pour évaluer l’effet de la modalité sur le temps d’attente du robot pour un don et a révélé des différences significatives ($\chi^2(2) = 10.2, p < .01$). Les comparaisons multiples post hoc utilisant une correction de Bonferroni ont également montré que les temps d’attente du robot étaient plus courts pour le don pendant la phase Immobile (Mdn = 13.9) que pendant la phase Surveillance (Mdn = 19.0), $Z = 2.95, p < 0.01$ et la phase Respiration (Mdn = 18.6), $Z = 4.51, p < 0.01$. D’autre part, les modalités Surveillance et Respiration ne diffèrent pas significativement, $Z = 1.02, p = 1.00$ (voir figure 4.12).

	Don	Retrait	Taux	SART
Don	1.00			
Retrait	0.40 ***	1.00		
Taux	0.03	0.07	1.00	
SART	-0.14	-0.07	-0.04	1.00

TABLE 4.1 – Corrélation entre le SART et les autres mesures objectives.

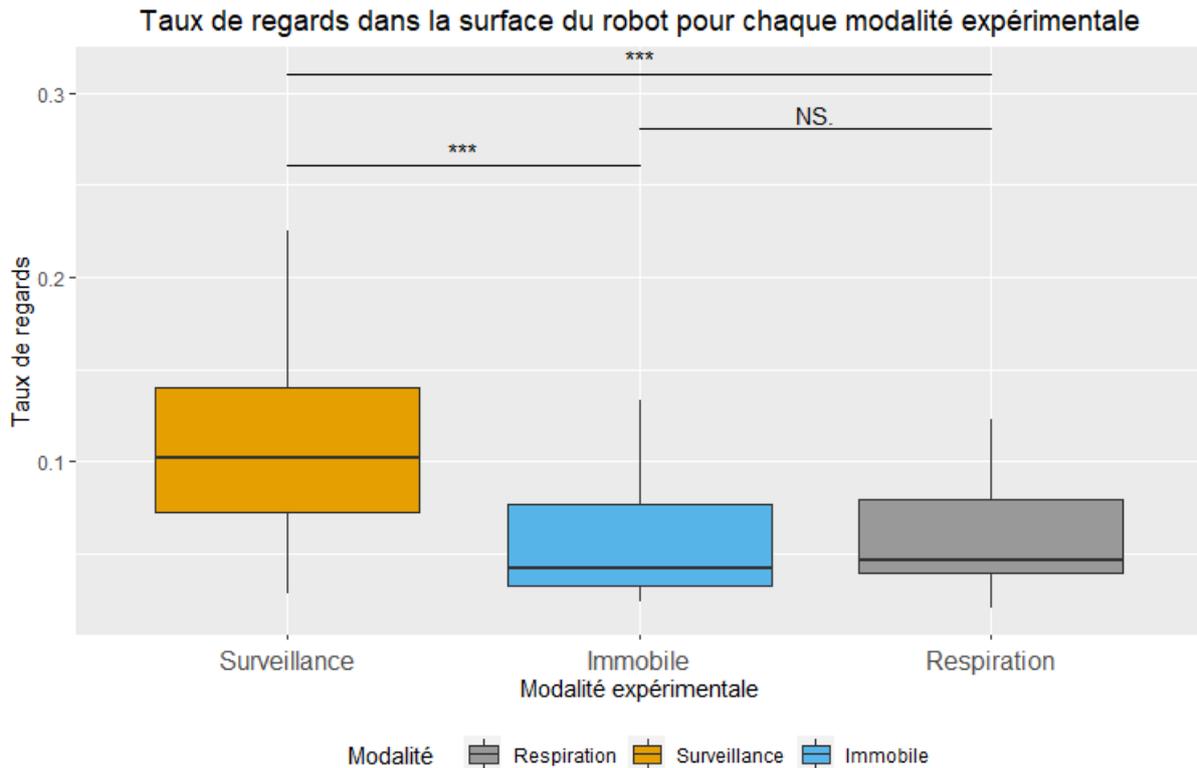


FIGURE 4.10 – Diagramme en boîte des taux de regard mesurés à l’intérieur de la surface d’intérêt de Robot pour chaque modalité. Surveillance à gauche en orange, Immobile au centre en bleu et respiration à droite en gris.

Un test de Friedman pour évaluer l’effet de la modalité sur le temps d’attente du robot pour un retrait a également été calculé. Les résultats des tests n’ont pas montré de différences significatives entre les modalités pour les temps d’attentes des retraits ($\chi^2(2) = 1.46, p = .482$) (voir figure 4.13).

Ces deux résultats concernant l’effet de la modalité sur le temps d’attente du robot, que l’action soit un don ou un retrait, contredisent notre hypothèse H3.

4.4 Discussion des résultats obtenus

L’objectif de ce chapitre était d’étudier, d’une part, le lien entre la capacité de projection (niveau 3 de la CS) et le partage d’attention d’un humain et d’autre part, l’influence des mouvements de signalisation sur l’attention d’un humain pendant qu’il réalise des tâches seul et en coopération avec un robot. Sur la base de ces deux objectifs scientifiques, trois hypothèses ont été proposées :

- **H1** : *La capacité de projeter l’action ultérieure d’un robot améliore la réactivité des individus dans les tâches faites en coopération.*
- **H2** : *Les individus possèdent une meilleure conscience de situation lorsqu’ils sont impliqué dans un plus grand nombre de tâches en coopération avec un robot.*
- **H3** : *Les individus portent plus rapidement leur attention vers le robot lorsqu’il génère un mouvement d’attente plutôt que lorsqu’il reste immobile.*

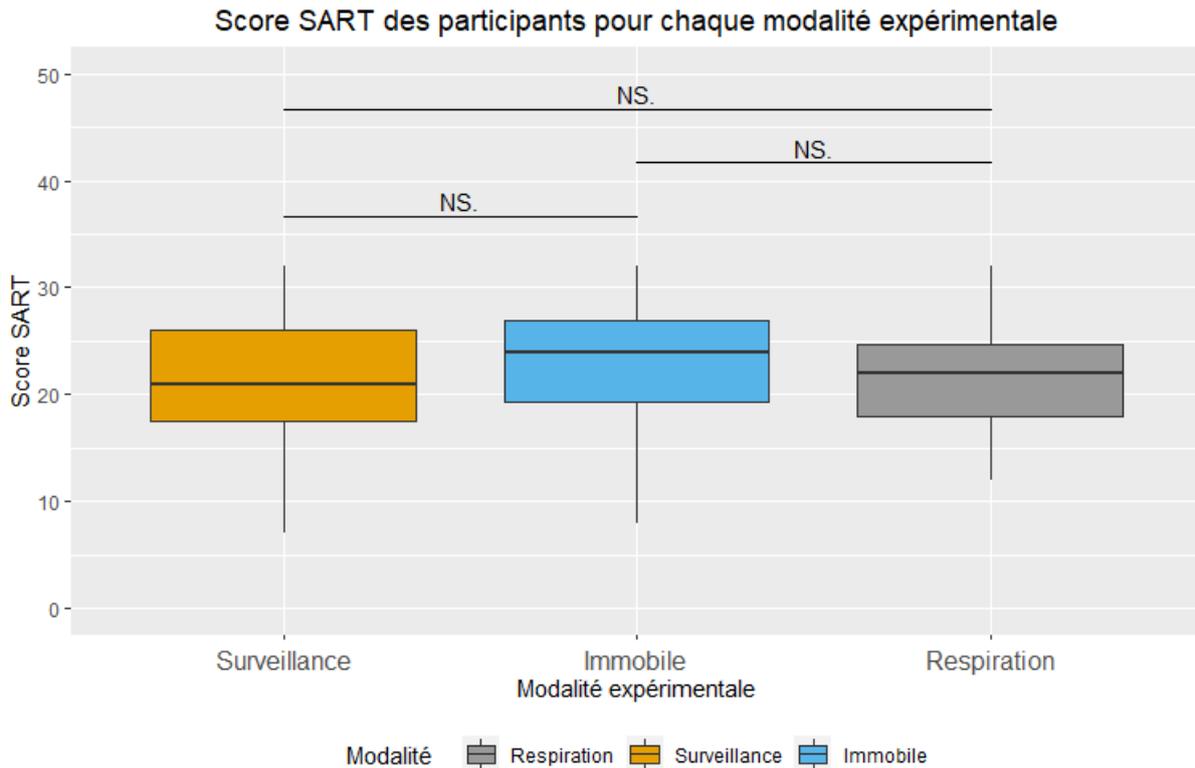


FIGURE 4.11 – Diagramme en boîte des scores SART calculés pour chaque modalité. Surveillance à gauche en orange, Immobile au centre en bleu et respiration à droite en gris.

Une fois opérationnalisée, l'hypothèse H2 a été divisée en deux sous-hypothèses (H2.1 et H2.2). La première a été testée à l'aide de mesures objectives et la seconde à l'aide de mesures subjectives.

L'analyse des résultats confirme les hypothèses H1 et H2.1. En revanche, nos résultats ne confirment pas les hypothèses H2.2 et H3. Plus important encore, nos résultats soutiennent le contraire de H3 : le robot capterait l'attention des participants plus rapidement en restant immobile plutôt qu'en bougeant lorsqu'il attend de l'aide. Dans cette section, nos résultats sont discutés pour chacune de ces hypothèses.

4.4.1 Lien entre la capacité de projection de la conscience de situation et la performance

Conformément à H1, les résultats ont montré un effet du type d'action sur le temps d'attente du robot. En général, les participants ont fait attendre le robot plus longtemps lorsqu'il devait effectuer un don plutôt qu'un retrait. Nous pensons que la raison réside dans la capacité à anticiper ou non les deux actions. D'une manière générale, les participants ont fait attendre le robot presque trois fois plus longtemps lorsqu'ils devaient effectuer un don (3.34 s pour le retrait et 10.92 s pour le don), quelle que soit la modalité.

Cela peut s'expliquer par le fait que le don ne pouvait être que partiellement anticipé. Le participant pouvait s'attendre à devoir donner un Duplo au robot (c'est-à-dire que l'un des stocks d'une couleur est vide), mais cela n'était pas garanti. En effet, il n'y a aucun moyen de savoir si la première couleur manquante sera celle demandée par le robot, ni quand le robot en aura

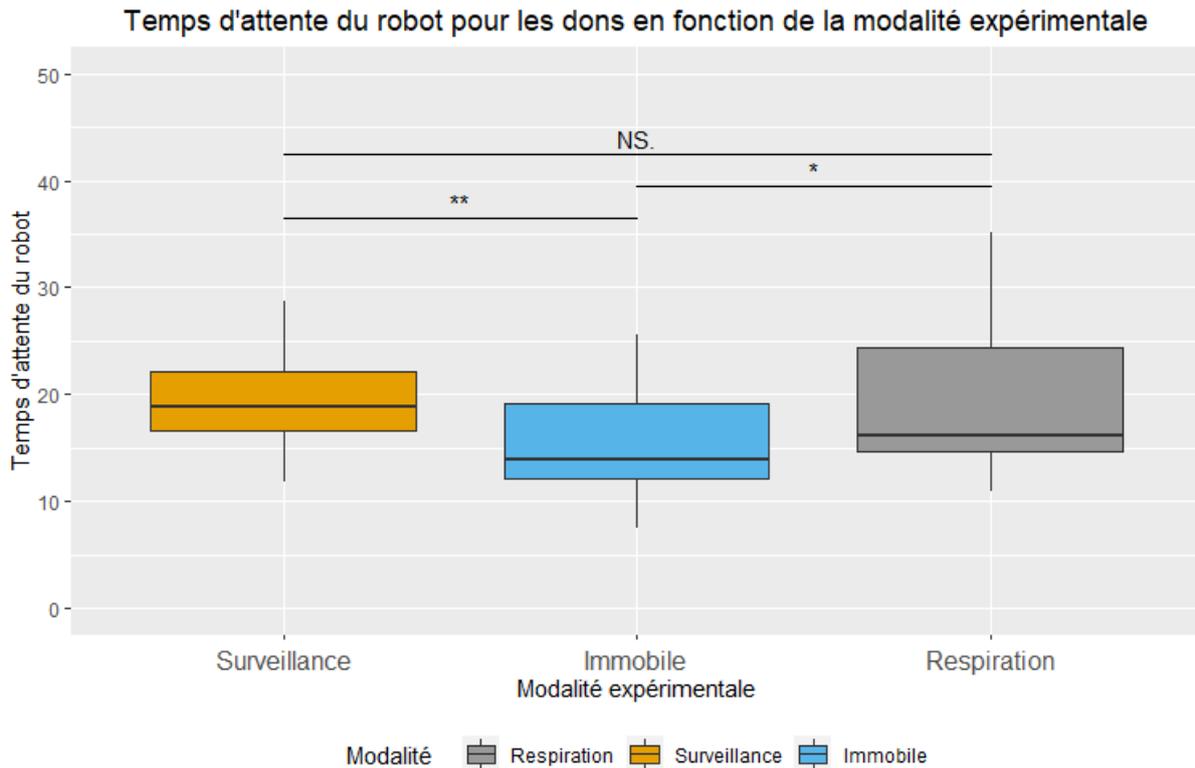


FIGURE 4.12 – Diagramme en boîte des temps d'attente mesurés pour le don pour chaque modalité. Surveillance à gauche en orange, Immobile au centre en bleu et respiration à droite en gris.

besoin. Pour ces raisons, on s'est assuré que la projection des participants serait entravée.

Inversement, l'action de retrait pouvait être anticipée à n'importe quel moment de la phase. Quoi qu'il arrive, cette action n'était demandée qu'une fois que le robot avait terminé sa tâche. Le déterminisme de cette action signifiait que le participant n'avait besoin que d'un coup d'œil pour vérifier la progression de la tâche du robot.

Le fait qu'il n'y ait eu que des différences dans les temps de réaction entre les modalités pour l'action de don a renforcé l'importance de la capacité des participants à se projeter. Indépendamment de la modalité de communication et de l'attention portée au robot (phase Surveillance), les participants ont toujours pris très peu de temps pour retirer les constructions robotiques. Inversement, pour le don, la méthode de communication ne semble pas avoir influencé le temps d'attente et donc le manque de projection. Cela souligne l'importance de soutenir le processus complet de la CS des personnes en coopération avec un robot.

4.4.2 Impact de l'implication dans les tâches sur l'évaluation de la conscience de situation

En ce qui concerne les données sur les taux de regard, elles sont cohérentes avec le fait que les participants ont respecté les instructions. Nos résultats ont montré une validation de H2.1 et indépendamment du temps d'attente du robot, un comportement général approprié des participants. Un indicateur intéressant pour l'évaluation de la CS aurait été de trouver une corrélation entre la distribution du regard des participants et le temps d'attente du robot. On pourrait s'attendre à ce qu'un participant qui prête souvent attention au robot ait des temps de réaction

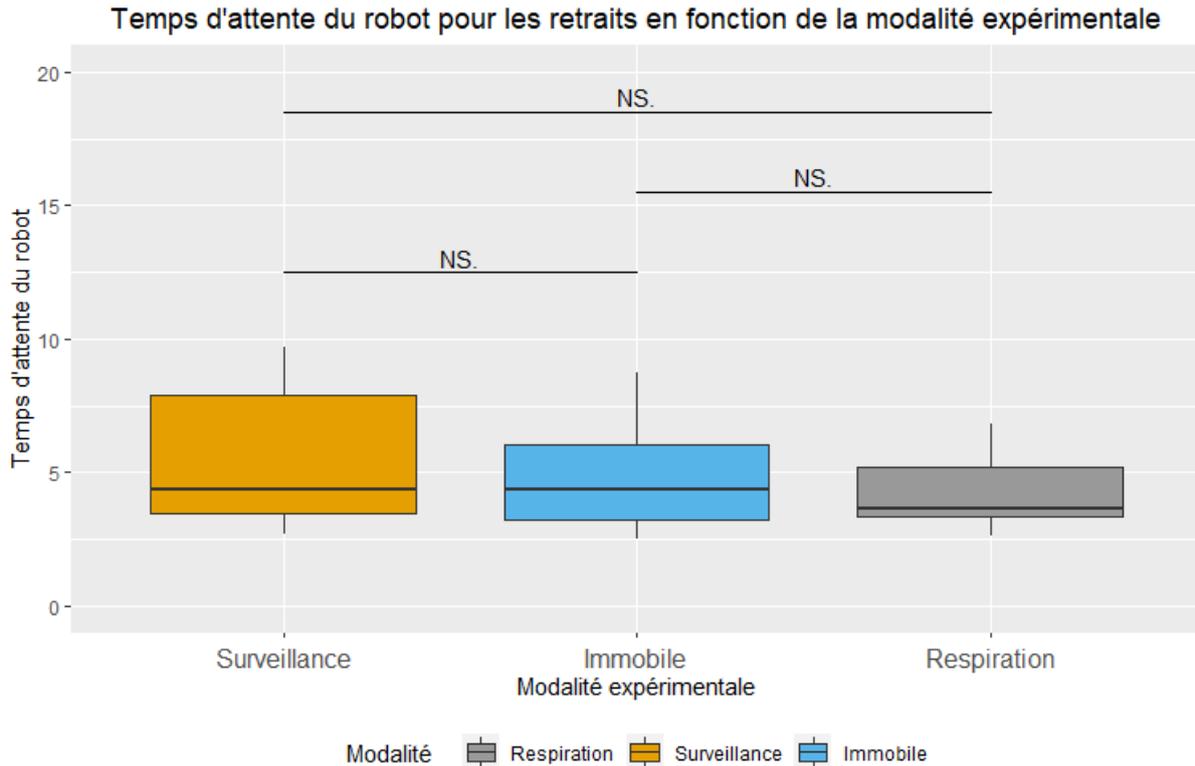


FIGURE 4.13 – Diagramme en boîte des temps d'attente mesurés pour le retrait pour chaque modalité. Surveillance à gauche en orange, Immobile au centre en bleu et respiration à droite en gris.

plus courts et fasse donc moins attendre le robot. Néanmoins, les résultats présentés dans le tableau 4.1 semblent suggérer qu'il n'y a pas de corrélation entre les taux de regard et les temps d'attente.

Contrairement à l'hypothèse H2.2, les participants n'ont pas estimé avoir une meilleure CS dans la première phase de l'expérience. Ce résultat peut sembler surprenant selon la littérature (Kaber & Endsley, 2004; Gombolay et al., 2017; Hopko et al., 2021; Roy et al., 2023), étant donné que l'instruction supplémentaire dans la modalité Surveillance était de regarder le robot et de lui prêter autant d'attention que possible. Cela leur a demandé de partager leur attention de manière significative. Ce faisant, ils devraient bénéficier d'une plus grande CS, puisque l'étape de perception de la boucle de la CS a été améliorée. Ce résultat est également étayé par le fait qu'aucune corrélation significative n'a été trouvée entre le SART et nos mesures objectives.

Ce résultat pourrait donc être lié à une évaluation incorrecte de la CS. Le SART est un questionnaire souvent critiqué pour l'évaluation de la CS. Le SAGAT est plus souvent recommandé comme mesure de la CS (Endsley et al., 1998). Sa nature en fait une mesure objective plutôt que subjective. D'autre part, l'un des points négatifs de ce questionnaire est qu'il exige de figer la tâche. Cela va à l'encontre de l'objectif de capter l'attention des participants. En effet, même si l'énigme de la Tour de Hanoï était une tâche distrayante, il était souhaitable d'absorber l'attention des participants autant que possible sur la tâche de la Tour de Hanoï. Le fait d'interrompre la tâche quatre fois (deux passages et deux retraits) par phase pouvait déjà fausser la concentration des participants sur la Tour de Hanoï. De ce fait, l'ajout de l'évaluation SAGAT aurait pu également compromettre la qualité de l'expérience.

4.4.3 Effet du mouvement de respiration sur l'attention

Alors que dans le chapitre précédent (chapitre 3), le mouvement de respiration améliorait la vigilance des personnes et donc leur sécurité, ce n'était pas le cas dans ce chapitre. Dans le travail présent, l'hypothèse H3 a été rejetée. Ce résultat peut s'expliquer de plusieurs manières. Tout d'abord, les participants n'avaient pas été informés de la signification du mouvement, ni même de son occurrence. Par opposition, le chapitre précédent montrait un effet positif des mouvements de signalisation en termes de performance dans un contexte de CHR, à la fois avec et sans information sur le mouvement.

Dans la présente expérience, le robot était en mouvement constant à proximité de l'opérateur humain. Par conséquent, le fait que le robot respire pour montrer qu'il est en attente n'a pas eu l'effet saillant escompté. Pendant cette phase, les participants ont vu le robot dans leur vision périphérique, actif et en mouvement permanent. Contrairement à la vision centrale, la capacité à discriminer les caractéristiques chute drastiquement en vision périphérique (Rosenholtz, 2016). Au vu des résultats, il semble que les participants n'aient pas été en mesure de faire la différence entre les mouvements du robot pour accomplir sa tâche et ses mouvements de respiration. Cependant, lorsque le robot restait immobile, les participants semblent avoir été interpellés par le changement d'état soudain du robot. L'arrêt du robot aurait donc été plus facilement remarqué. Nous pensons que ce problème se situe au niveau 1 de la CS, c'est-à-dire au niveau de la perception. Cette explication est d'autant plus plausible que le robot restait parfois immobile quelques secondes pendant les passations pour des raisons techniques. Bien que nous ne soyons pas en mesure d'en fournir une preuve concrète à partir des données, les participants étaient très souvent alertés par ces arrêts soudains du robot et tournaient leur regard vers lui.

Les résultats suggèrent que le fait de rendre le robot immobile peut également être considéré comme un geste de communication non-verbale. Dans le présent contexte de coopération, le robot effectuait une tâche continue. L'utilisation du mouvement pour communiquer n'a pas fait de différence. En revanche, le fait d'arrêter le mouvement du robot et de le maintenir immobile a provoqué une rupture dans l'activité du robot et de l'espace de travail, et donc dans la perception de l'humain.

4.4.4 Limites de l'expérimentation mise en place

Notre expérience a révélé un biais potentiel en ce qui concerne l'achèvement des tours de Hanoi. L'achèvement du jeu peut être divisé en plusieurs sous-problèmes, correspondant à des étapes intermédiaires à atteindre avant de terminer le jeu. Les ressources attentionnelles ont été mobilisées en fonction de ces étapes intermédiaires. Par exemple, l'une des étapes intermédiaires de l'achèvement correspond au placement du plus grand disque sur le piquet final, c'est-à-dire à la moitié de la résolution. Ainsi, lorsqu'un participant était proche d'une de ces étapes facilement identifiables, ses ressources cognitives et son attention étaient moins sollicitées, lui offrant l'opportunité de focaliser son attention sur le robot pendant quelques instants. Si cette fin d'étape était temporellement corrélée avec le moment d'attente du robot, la probabilité d'une intervention humaine serait plus élevée. Les expérimentateurs ont observé que les participants avaient tendance à jeter un coup d'œil au robot chaque fois qu'ils terminaient un jeu. Cela était particulièrement vrai pour ceux qui réussissaient à faire le jeu plusieurs fois. Certains participants n'ont terminé le jeu qu'une seule fois par phase, cette limite ne s'appliquant donc pas dans ce cas. Pour ceux qui ne parvenaient pas à résoudre le problème, la frustration de l'échec pouvait être une raison de regarder le robot plus souvent.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le lien entre la capacité de projection des prochaines actions d'un robot et le partage de l'attention d'un humain dans un scénario de coopération. Ce chapitre nous a permis de répondre à la question 4 :

Question 4

Les mouvements de signalisation d'un robot permettent-ils d'extraire un humain d'un état de tunnélisation attentionnelle et d'atténuer son manque de capacité de projection dans un scénario de coopération humain-robot ?

Dans un premier temps, les résultats expérimentaux ont montrés un engagement attentionnel des participants plus important sur leur propre tâche lorsqu'ils étaient incapables de prédire que le robot allait avoir besoin d'une assistance de leur part (i.e. un don). Cela souligne la nécessité de prendre en compte les capacités attentionnelles humaines dans les scénarios d'action conjointe impliquant un partenaire robotique. En effet, les participants semblent s'être retrouvés dans des situations de tunnélisation attentionnelle sur leur tâche lorsque leur capacité de projection était dégradée. Dans le cas où ils pouvaient prévoir l'attente du robot (i.e. pour un retrait), les participants n'étaient pas en dehors de la boucle de fonctionnement du robot. À l'aide de leur modèle mental de la tâche, ils pouvaient ainsi correctement prédire à court terme que le robot aurait besoin d'assistance.

Ce chapitre nous a aussi permis de vérifier si les mouvements de signalisation d'un robot pouvait permettre d'extraire les personnes d'un état de tunnélisation attentionnelle. L'expérimentation a révélé que les arrêts du robot étaient plus saillants pour attirer l'attention d'un partenaire humain que des mouvements de signalisation de respiration dans le contexte d'une tâche de coopération. Cela a été vérifié seulement dans le cas où les personnes ne pouvaient pas prévoir l'attente prochaine du robot. Ces résultats nous amène à considérer l'immobilité, ou l'arrêt, du mouvement du robot comme un moyen de communication non-verbale du robot et, par extension, comme un mouvement de signalisation supplémentaire.

Dans le chapitre 3, la tâche principale du robot consistait à rester inactif. Ainsi, les participants étaient directement alertés par le fait que le robot se déplaçait, car le fait de bouger rompait la dynamique de l'environnement. Dans le présent chapitre, c'est l'inverse qui s'est produit. Les participants sont habitués à voir le robot bouger dans leur vision périphérique. Ainsi, le fait qu'il génère un mouvement de respiration n'attire pas leur attention et ne les sort pas de leur état de tunnélisation. En revanche, le fait qu'il soit soudainement immobile va être plus saillant pour eux et ainsi attirer leur attention. Il semble donc que le contexte et la dynamique de l'environnement de travail soient des caractéristiques majeures à prendre en compte dans l'utilisation des mouvements de signalisation .

Une autre perspective de travaux futur réside dans la capacité à estimer la CS en temps réel dans un contexte de coopération à l'aide de mesures oculométriques. Notamment, il pourrait s'avérer fortement intéressant de détecter, en temps réel, une tunnélisation potentielle du partenaire humain. Le robot pourrait ainsi adapter son comportement et communiquer à son partenaire humain un besoin imminent d'intervention ou utiliser une mesure de dé-tunnélisation. Cela suppose que le partage d'attention d'une personne reflète sa CS et les modèles mentaux associés à la tâche. Dans le présent travail, les actions du robot ont été exécutées par défaut et

n'ont pas été conditionnées par le partage d'attention réel des participants.

Chapitre 5

La saillance des mouvements de signalisation

Table des matières

Introduction	104
5.1 Synthèse comparative des deux expérimentations	105
5.2 Influence du mode d'interaction entre l'humain et le robot	107
5.3 Influence de la dynamique de l'environnement de travail	108
5.4 Influence du choix du mouvement	110
5.5 Recommandations pour la conception de mouvements de signalisation	112
Conclusion	113

Introduction

Dans ce manuscrit, nous avons proposé d'utiliser les mouvements d'un robot collaboratif comme moyen de communication non-verbale avec un partenaire humain. Ces mouvements, nommés mouvements de signalisation, sont générés grâce à la redondance articulaire des robots et sont superposés à leur tâche principale. Ils permettent de rajouter une dimension de communication aux mouvements effectués par le robot pour accomplir ses tâches. Ces mouvements ont contribué à rendre les robots collaboratifs plus transparents pour leurs partenaires humains et ont ainsi amélioré l'interaction.

Dans le présent chapitre, nous proposons d'étudier la saillance des mouvements de signalisation pour améliorer la conscience de la situation de partenaires humains en robotique collaborative. Pour cela, nous discuterons d'abord des deux expérimentations et de leurs différences conceptuelles. Nous analyserons ensuite les différents facteurs qui ont contribué à la saillance des mouvements de signalisation proposés dans cette thèse. Sur la base de ces facteurs, nous proposerons des recommandations pour l'utilisation des mouvements de robot en tant que vecteur de communication saillant dans la robotique collaborative.

Ce chapitre répond à la question 5 présentée en Introduction de ce manuscrit.

Question 5

Quels sont les facteurs qui contribuent à rendre les mouvements de signalisation saillants et porteur de la signification prescrite ?

Nous débutons ce chapitre en faisant la synthèse des deux expérimentations menées dans les chapitres 3 et 4 en section 5.1. Ensuite, nous discuterons des différents facteurs qui ont une influence sur la saillance des mouvements de signalisation dans les sections 5.2 à 5.4. Nous y aborderons les modes d'interaction (section 5.2), la dynamique de la tâche (section 5.3) et le choix du mouvement (section 5.4). Enfin, nous terminerons ce chapitre par des recommandations pour la conception des mouvements de signalisation en section 5.5.

5.1 Synthèse comparative des deux expérimentations

Deux expérimentations ont été mises en place pendant ces travaux de thèse (chapitre 3 et 4). Dans chacune d'elle, nous avons montré un effet positif des mouvements de signalisation sur la CS des participants. Les mouvements de signalisation ont également contribué à éviter les trois schémas d'accidents exposés dans la section 2.4.2 du chapitre 2.



FIGURE 5.1 – Mouvement de fléchissement mis en œuvre dans la première expérimentation.

Dans la première expérience (chapitre 3), nous avons mis en place deux mouvements de signalisation. Le premier était un mouvement de signalisation d'état, la respiration, permettant au robot d'informer les participants que le robot était actif et pouvait reprendre son activité à tout moment (voir figure 5.2). Le second était un mouvement de signalisation d'action, le fléchissement, permettant au robot de communiquer à l'humain à propos de la tâche qu'il réalise (voir figure 5.1).

Dans la deuxième expérience (chapitre 4), nous avons ré-utilisé le mouvement de respiration pour informer les participants que le robot était dans un état d'attente d'une action de leur part (voir figure 5.2). Les résultats de l'expérimentation ont révélés que le mouvement de respiration était moins saillant que l'arrêt des mouvements du robot pour attirer l'attention des personnes vers le robot. Cela nous a amené à considérer l'arrêt des mouvements du robot, ou

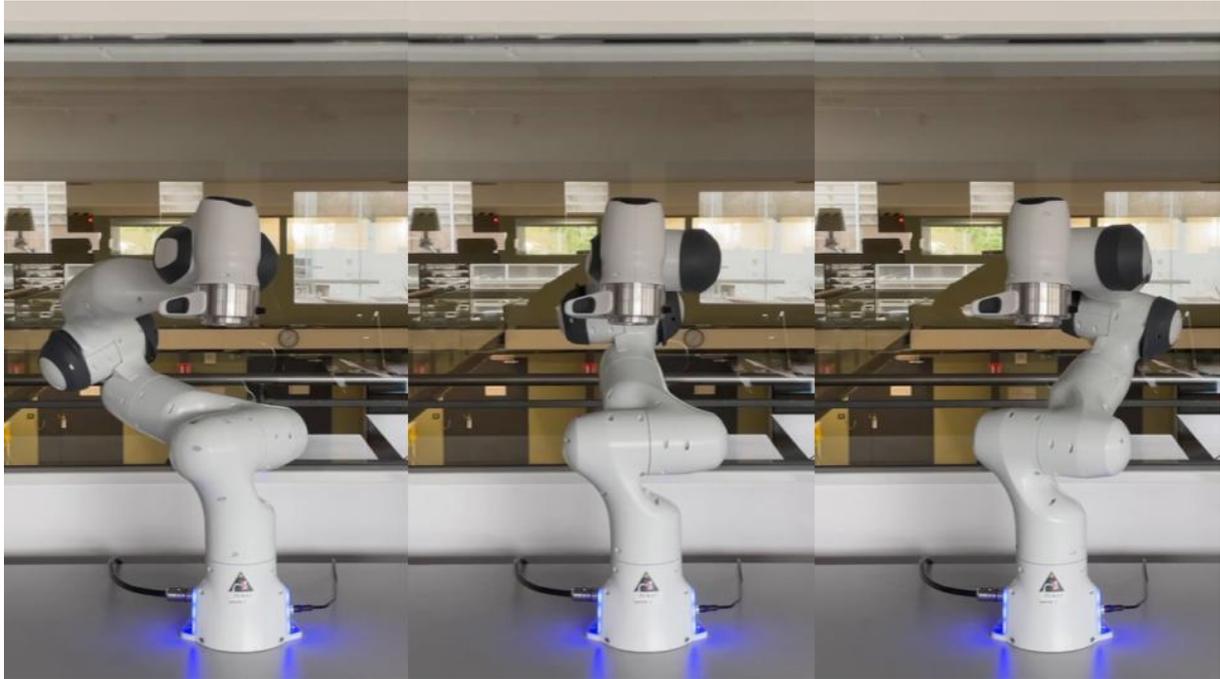


FIGURE 5.2 – Exemple du mouvement de respiration mis en œuvre dans les deux expérimentations.

l’immobilité, comme un mouvement de signalisation supplémentaire.

Il semblerait que les mouvements de signalisation ont bien permis d’atténuer, voir même d’éviter, la succession d’apparition des démons de la CS, tels que présentés dans le chapitre 2 (voir figure 5.3), au cours de nos expérimentations. Le mouvement de respiration, dans le chapitre 3, a empêché les participants de se retrouver dans le schéma d’accident n°1 (page 50). Ce mouvement a contribué à soutenir le modèle mental des participants et à renforcer leur vigilance lorsqu’ils passaient proche du robot. Lorsque le robot effectuait un mouvement de fléchissement, il permettait d’éviter la manifestation du schéma n°2 (page 50). Ce mouvement a permis de ré-introduire l’humain dans la boucle d’action du robot et a ainsi amélioré leur performance et renforcé leur CS. Enfin, dans le cas du chapitre 4, l’arrêt des mouvements du robot a été plus saillant que le mouvement de respiration pour extraire les participants d’un état de tunnélisation et donc pour prévenir du schéma n°3 (page 50).

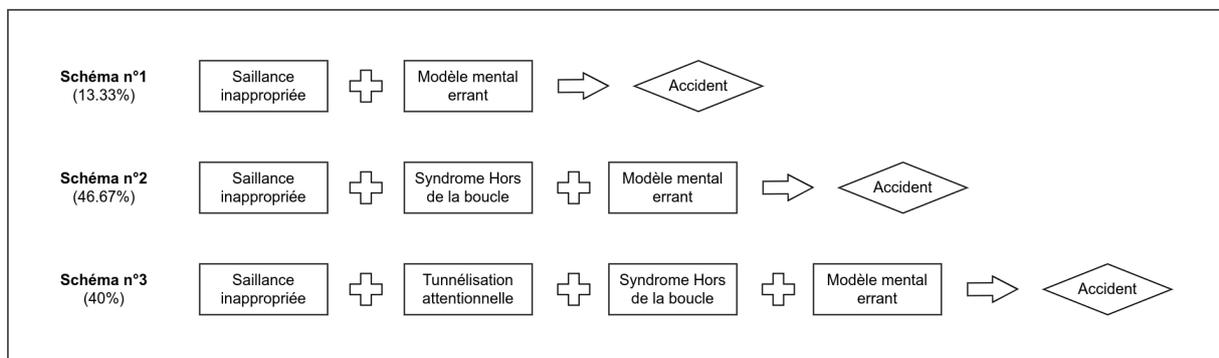


FIGURE 5.3 – Schémas des séquences d’apparition de démons de la CS présentés en chapitre 2.

Dans la suite de ce chapitre, nous discuterons des différents facteurs qui ont pu rendre inefficace le mouvement de respiration pour dé-tunnéliser les participants dans la deuxième expérimentation. Ces facteurs représentent les différences conceptuelles entre les deux expériences

présentées dans le manuscrit de cette thèse. D'abord, il se peut que le mode d'interaction entre l'humain et le robot ait eu une influence dans la perception du mouvement de signalisation. La deuxième différence concerne la dynamique générale de l'environnement de travail dans les deux expérimentations. Enfin, le troisième facteur concerne le choix du mouvement tout en tenant compte de ses propriétés physiques : la position, la vitesse et l'accélération.

5.2 Influence du mode d'interaction entre l'humain et le robot

Il semble que le mode d'interaction entre l'humain et le robot ait eu une influence sur la perception des mouvements de signalisation dans nos deux expérimentations. Dans le chapitre 3, la tâche de simulation de découpe de bois est faite en collaboration avec le robot (Cobot 1). Aussi, ils sont en coexistence avec le deuxième robot (Cobot 2) puisqu'ils partagent le même environnement de travail. En revanche, dans le chapitre 4, les tâches sont réalisées en coopération. Ces différents modes d'interaction ont également influencés la disposition des agents dans l'environnement de travail. De ce fait, les participants portaient différemment leur attention vers leurs partenaires robotiques.

Pendant la tâche de simulation cobotisée de découpe de bois (chapitre 3), l'humain ne réalise aucune autre tâche que celle en collaboration avec le robot (Cobot 1). Ils partagent le même espace de travail, au même moment et travaillent simultanément sur le même produit ou composant (Bauer et al., 2016; Müller et al., 2017; Matheson et al., 2019; Kumar et al., 2020). De ce fait, le nombre de distractions potentielles de la tâche est réduit et les participants peuvent pleinement se concentrer sur leurs actions. Aussi, le fait que la tâche soit faite en collaboration implique que les participants avaient toujours le robot dans leur champs visuel, face à eux, pendant qu'ils poussent la planche en bois (voir figure 5.4). Pendant la tâche de collaboration, le mouvement de signalisation généré concerne la tâche effectuée par le robot et permet à l'opérateur de comprendre et projeter les actions de son partenaire.

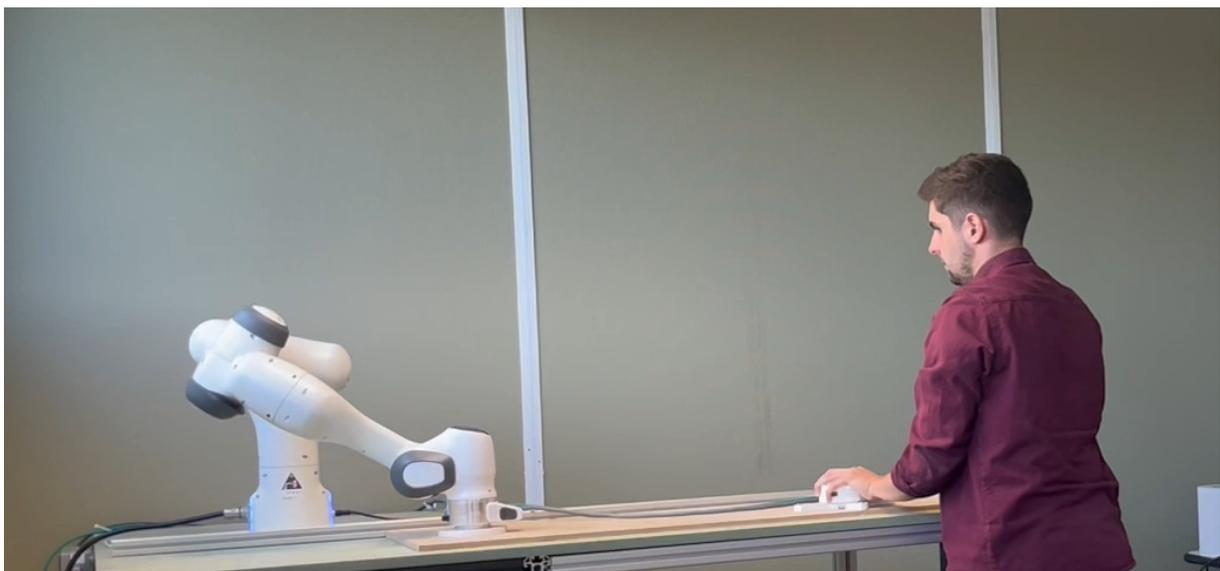


FIGURE 5.4 – Placement des participant par rapport au robot dans la première expérience. Le robot est placé dans le champs visuel du participant.

Pour le robot (Cobot 2) effectuant des mouvements de signalisation de respiration, la co-

existence suscite deux particularités. L'humain et le robot partagent le même environnement mais ne partagent pas leur espace de travail respectif (Bauer et al., 2016; Müller et al., 2017; Matheson et al., 2019; Kumar et al., 2020). D'abord, la disposition de la salle fait que le robot est dans le dos des participants et qu'ils ne le perçoivent pas la majeure partie du temps. Ainsi, ils ne prêtent pas attention à son activité. Cela ne provoque pas de danger physique pour les personnes puisque le robot est suffisamment éloigné d'eux. En revanche, dès lors qu'ils devaient se déplacer dans la salle expérimentale, le robot était dans leur champs visuel. Par conséquent, l'attention visuelle des participants était dirigée vers le robot. Comme il n'y a ni partage d'espace de travail ni partage de tâche, le mouvement de signalisation réalisé par le robot a seulement besoin de communiquer à propos de son état.

Dans le chapitre 4, les participants participent à une tâche de coopération. Ils partagent le même espace de travail, au même moment et sur des tâches séparées (Bauer et al., 2016; Müller et al., 2017; Matheson et al., 2019; Kumar et al., 2020). L'humain, de son côté, a pour rôle de terminer le plus de fois le jeu des tours de Hanoï. Le robot, lui, doit réaliser une tâche de construction de pile de Duplo. Occasionnellement, l'humain doit coopérer avec son partenaire robotique et l'assister dans sa tâche de construction. Cette répartition des tâches induit que les participants n'ont porté que très peu leur attention vers le robot, typiquement seulement lorsque nécessaire. Il convient cependant de garder en tête que le robot se situait dans leur vision périphérique (voir figure 5.5). Un autre élément qui peut affecter la saillance du mouvement de signalisation concerne la nature de la tâche des tours de Hanoï. Cette dernière requiert un niveau élevé de concentration et d'attention pour être accomplie (Simon (1975)). Elle engendre ainsi une charge cognitive élevée pour le participant, ce qui mène à dégrader les capacités de perception du mouvement dans la vision périphérique (Vater et al., 2022). Il est aussi important de prendre en compte la disponibilité cognitive de l'opérateur (Gateau et al., 2016). Dans le cas où ce dernier est concentré sur sa tâche, les chances qu'il s'aperçoive que le robot cherche à communiquer avec lui sont amoindries. Dans le cas de la coopération, le robot doit communiquer à propos de son état mais aussi à propos de sa tâche pour maintenir l'humain dans sa boucle d'action ou l'empêcher de tunneler son attention sur sa propre tâche et ce, au bon moment.

De par leur nature, les modes d'interaction impliquent donc différents besoins de communication. En effet, nous avons pu voir que selon la configuration de l'environnement de travail, les mouvements de signalisation générés par un robot collaboratif n'ont pas pour rôle de communiquer les mêmes informations à leur partenaire humain. Notamment, nous avons vu que l'attention que l'opérateur porte sur le robot peut différer selon s'il y a coexistence, coopération ou collaboration. Un autre facteur qui pourrait influencer l'attention portée vers un mouvement de signalisation relève de la perception de ce mouvement dans l'environnement de travail.

5.3 Influence de la dynamique de l'environnement de travail

Bien que, dans le chapitre 3, le mouvement de respiration améliorerait la vigilance des personnes, ce n'était pas le cas dans le chapitre 4. En effet, l'attention des participants étaient plus rapidement attiré par les arrêts du robot. Cela peut s'expliquer du fait que le contexte de la tâche et l'utilisation du mouvement étaient différents. Dans le chapitre 3, le geste avait été utilisé pour indiquer un état de passivité et d'inactivité temporaire. Cette fois, l'indication de l'attente d'une intervention humaine lors de l'exécution d'une tâche a été ajoutée.

Une première différence dans la saillance du mouvement de signalisation de respiration réside dans l'activité du robot qui précède l'état d'attente. Dans l'expérience du chapitre 4, le



FIGURE 5.5 – Placement du robot par rapport au participant dans la deuxième expérience. Le robot est placé sur la droite du participant, dans sa vision périphérique.

robot était en mouvement constant à proximité de l'opérateur humain. Par conséquent, le fait que le robot respire pour montrer qu'il attend n'a pas eu l'effet saillant escompté. Le robot était actif et en mouvement permanent dans la vision périphérique des participants (voir figure 5.5). Contrairement à la vision centrale, la capacité à discriminer les caractéristiques chute drastiquement en vision périphérique (Rosenholtz, 2016). Cela est d'autant plus le cas dans des situations visuellement bruitées où il a été suggéré que la vision périphérique ne parvient pas à séparer le signal (dans notre cas le mouvement de signalisation) du bruit visuel (les autres mouvements du robot) (Thompson et al., 2007). De plus, au vu des résultats, il semble que les participants n'aient pas été en mesure de faire la différence entre les mouvements du robot pour accomplir sa tâche et ses mouvements de respiration. Le fait qu'ils aient été concentrés à jouer au jeu des tours de Hanoï les a rendus aveugles au changement de mouvement du robot dans l'espace de travail. Aussi, un signal trop faible, lent ou semblable au signal précédent, n'attire pas suffisamment l'attention et résulte en une cécité au changement (Rensink, 2002).

A l'inverse, dans le chapitre 3, le Cobot 1, qui générait des mouvements de signalisation d'action n'effectuait aucun mouvement de ses articulations lorsqu'il reproduisait les résistances de bois. Ainsi, le fait qu'il superpose à sa tâche de poussée des mouvements de communication interpellait les participants. Là encore, c'est le changement d'état soudain du robot qui attire l'attention des participants et rend le mouvement saillant. Cette hypothèse est renforcée par les résultats du chapitre 4. Lorsque le robot restait immobile, les participants semblent avoir été interpellés par le changement d'état soudain du robot. Cela est d'autant plus plausible que le robot pouvait parfois s'arrêter entre ses sous-tâches pendant les expériences pour des raisons techniques. Bien que nous ne soyons pas en mesure d'en fournir une preuve concrète à partir des données, les participants étaient très souvent alertés par ces arrêts soudains du robot et tournaient leur regard vers lui.

Une partie de la saillance des mouvements de signalisation résiderait donc dans le fait que ce dernier doit rompre avec la dynamique actuelle de mouvement du robot. Par exemple, si le

robot est constamment en mouvement, alors une signalisation adaptée pour attirer l'attention de la personne consiste à arrêter les mouvements du robots. En revanche, si le robot est principalement statique, alors il convient de le mettre en mouvement pour attirer l'attention de l'opérateur. Cela est cohérent avec les limites des capacités humaines à la détection des changements (Rensink, 2002). Un moyen supplémentaire de rompre avec la dynamique actuelle consisterait à changer le mouvement du robot ou à manipuler la dynamique du robot : sa position, sa vitesse ou son accélération.

5.4 Influence du choix du mouvement

Un autre aspect à prendre en compte dans la saillance d'un mouvement de signalisation réside dans le choix du mouvement lui-même et de la signification qu'il doit porter. Cela peut être rendu difficile du fait de la méthode de génération de ce type de mouvements de communication. En effet, comme expliqué dans la section 3.1 du chapitre 3, les mouvements de signalisation sont superposés aux mouvements réalisés pour effectuer la tâche du robot grâce à sa redondance articulaire. Les mouvements de communication ne doivent donc pas interférer avec la tâche principale du robot. Cela est d'autant plus important dans le contexte de la robotique industrielle puisque le robot doit avant tout être un agent opérant et non pas un agent de communication.

Comme nous l'avons vu dans la section 3.1.1 du chapitre 3, le mouvement peut être considéré comme un sens à part entière, à la fois comme un objet d'action et de perception (Berthoz, 1997). D'après la théorie de Berthoz (1997), le mouvement doit être vu comme une boucle fermée rétroactive, qui s'ajuste au cours du temps en fonction de la perception. Les études sur la perception du mouvement soulignent la capacité humaine à en distinguer des caractéristiques physiques ou cognitives (Colombel, 2022) comme l'identité d'une personne (Cutting & Kozlowski, 1977; Westhoff & Troje, 2007), son genre (Troje, 2002; Mather & Murdoch, 1994), des émotions (Dittrich et al., 1996; Parkinson et al., 2017) ou l'état de santé d'un individu (Sundelin et al., 2015; Kramer et al., 2010). Cette capacité de distinction ne se limite pas à la perception de mouvements humains mais s'applique aussi pour les mouvements de robots. Il a été montré que des observateurs humains sont capables de reconnaître des gestes d'hésitation d'un robot dans des scénarios de CHR (Moon et al., 2011). Les mouvements d'un robot pourraient être un moyen d'indiquer aux utilisateurs les actions et les interactions possibles (Hoffman & Ju, 2014). Ces indices sont appelés « affordances » (Norman, 1999) et font référence aux possibilités d'action facilement perceptibles par un acteur.

Dans le chapitre 3, le mouvement de fléchissement représentait un mouvement antagoniste de résistance à la poussée de l'humain. Métaphoriquement, on pourrait voir ce mouvement postural comme une personne se tenant sur ses appuis afin de résister à la poussée d'un autre individu. Plus l'individu qui résiste est fléchi sur ses appuis, plus il résistera à la poussée de son adversaire. Ici, le fléchissement du robot symbolise cet individu qui résiste à la poussée de l'adversaire, à savoir son partenaire humain (voir figure 5.1). Le mouvement de respiration symbolisait que le robot était actif, ou « en vie » (Terzioğlu et al., 2020; Cuijpers & Knops, 2015). Dans le chapitre 3, il indiquait une potentielle reprise d'activité soudaine et donc, un danger. Dans le chapitre 4, il signifiait l'attente du robot d'une action de l'humain. Dans cet état, le robot tournait légèrement sa pince vers son partenaire humain (voir figure 5.6), comme s'il le regardait, et restait statique, tout en respirant, comme un être vivant. Ces deux types de mouvements font écho aux travaux qui portent sur les caractéristiques anthropomorphiques du mouvement

des robots (Duffy, 2003; Terzioğlu et al., 2020; Kuz et al., 2015; Petruck et al., 2016). L'anthropomorphisme correspond à l'attribution de propriétés ou de caractéristiques semblables à celles d'humains à des objets (Duffy, 2003). D'après ces travaux, doter les mouvements des robots de propriétés anthropomorphiques favoriserait leur acceptabilité et soutiendrait également la compréhension de l'intention du robot par l'opérateur (Kuz et al., 2015; Terzioğlu et al., 2020). Ainsi, cela rendrait les robots plus transparents vis-à-vis de leurs partenaires (Alonso & De La Puente, 2018).

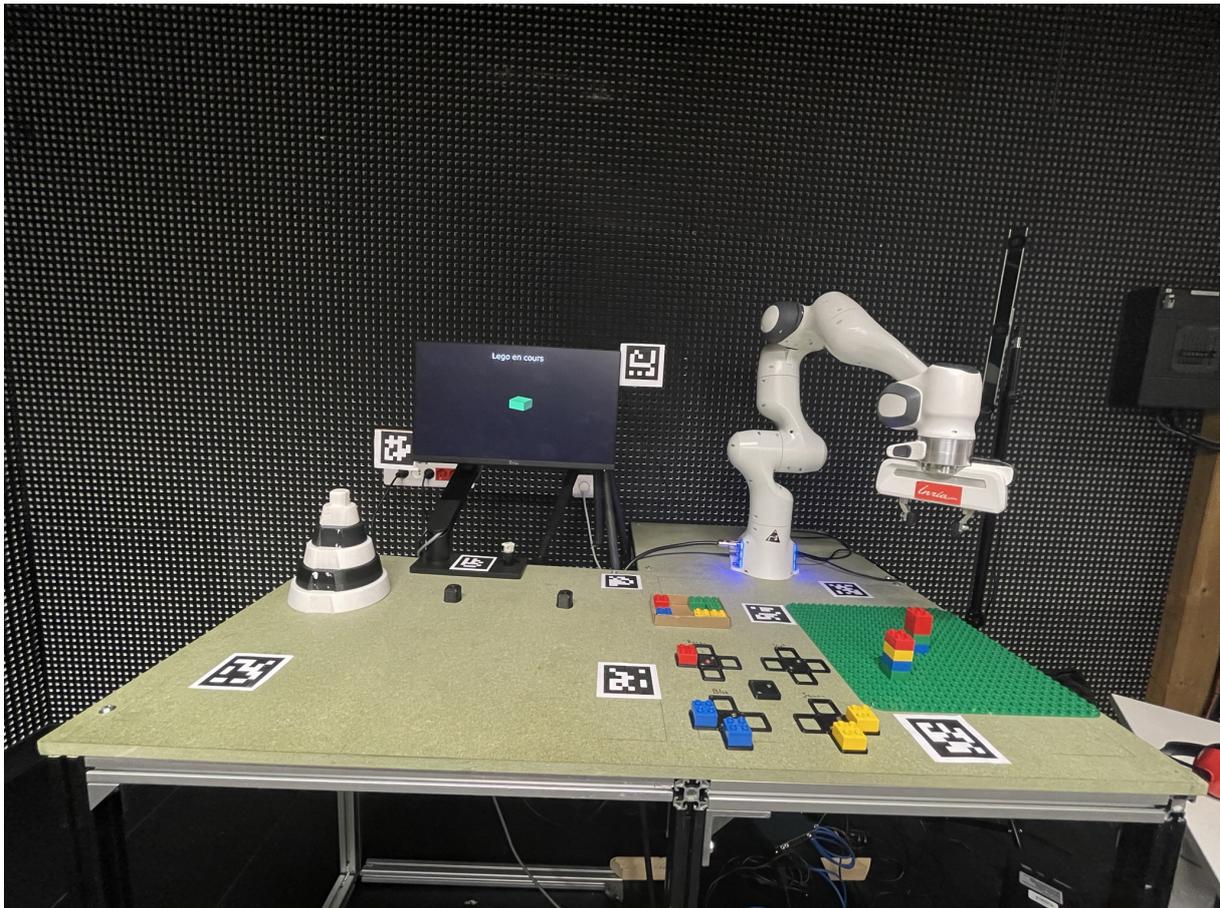


FIGURE 5.6 – Posture d'attente du robot dans la deuxième expérience. Le robot est placé au dessus de la plaque de Duplo, la pince légèrement tournée vers le partenaire humain.

Le choix du mouvement doit aussi se faire en considérant la dynamique du robot : la position, la vitesse et l'accélération. Pour la position, il a été recommandé de limiter la zone de déplacement du robot et d'informer préalablement les opérateurs humains des mouvements du robot de manière à ce qu'ils disposent d'une faible charge cognitive (Arai et al., 2010). D'après les auteurs, la vitesse d'un robot peut aussi impacter négativement la charge cognitive des opérateurs. D'autres travaux ont montrés qu'une vitesse plus élevée des mouvements d'un robot couplée à une faible prévisibilité augmentent la perception du risque, l'anxiété et la charge de travail des opérateurs tout en diminuant la performance à la tâche (Koppenborg et al., 2017). Les auteurs soutiennent l'idée que les mouvements erratiques du robot avec des directions de mouvement ambiguës peuvent empêcher l'opérateur de développer un modèle mental approprié des fonctions et des mouvements du robot. Aussi, un robot qui se déplace rapidement peut perturber la réalisation d'une tâche en détournant l'attention visuelle de l'opérateur. Enfin, il a été mis en avant qu'une vitesse élevée d'un robot dans son espace de travail augmente le temps d'attente d'un opérateur avant d'entrer dans ce même espace (Or et al., 2009).

Des travaux en physiologie ont montrés que des mouvements rapide et perçus menaçants provoquent une conductance cutanée plus élevée (Takahashi et al., 2001; Kulić & Croft, 2007; Dehais et al., 2011). Cette hausse correspond à une augmentation du stress (Handri et al., 2010) ou de la charge cognitive (Shi et al., 2007). Aussi, il a été mis en évidence qu'une vitesse élevée du robot augmente le temps de fixation vers ce dernier (Dehais et al., 2011). Cette augmentation du temps de fixation est due à la caractéristique menaçante du robot conduisant l'opérateur à être vigilant vis-à-vis de son partenaire. A l'inverse, les auteurs ont montrés que des mouvements trop lents augmentent le nombre de saccades oculaires vers le robot et contribuent à rendre difficile la compréhension de son intention et la décision d'action du partenaire humain (Dehais et al., 2011).

Même si le choix du mouvement en tant que tel semble être un facteur déterminant dans la saillance d'un mouvement de signalisation, nous avons vu que les composantes du mouvement qui le définissent ont aussi une influence. Nous avons vu que la position, la vitesse et l'accélération du mouvement d'un robot avaient des effets impactant tant psychologiquement que physiologiquement sur les partenaires humains.

5.5 Recommandations pour la conception de mouvements de signalisation

Sur la base de ces facteurs, nous proposons une liste de recommandations pour la conception de mouvement de signalisation. Cette dernière s'adresse aux roboticiens et à toutes les personnes souhaitant exploiter les mouvements d'un robot comme canal de communication non-verbale pendant qu'il réalise une tâche. L'objectif de ces recommandations est d'assurer la saillance des mouvements de signalisation et ainsi renforcer la sécurité d'opérateurs en interaction avec des robots collaboratifs.

1. **Le mode d'interaction** : c'est le premier élément à prendre en compte lorsqu'on souhaite communiquer de manière saillante avec les mouvements d'un robot. Un même mouvement sera perçu différemment selon la disposition de l'espace de travail et la nature de l'interaction.

(a) Dans le cas d'une coexistence, c'est-à-dire seulement le partage de l'environnement de travail, le robot n'a pas besoin de communiquer à propos de sa tâche mais uniquement à propos de son état avec l'humain. Ici, les mouvements de signalisation doivent avant tout favoriser la sécurité de l'opérateur et l'empêcher de se mettre en danger. L'objectif est de soutenir le modèle mental de l'opérateur et ainsi de favoriser sa sécurité en empêchant toute prise de risque. Idéalement, le mouvement de signalisation ne doit être mis que lorsque c'est nécessaire et non pas par défaut au risque de provoquer le démon de la saillance inappropriée (section 1.3.3).

(b) Dans le cas d'une coopération, l'humain et le robot partagent leur espace de travail et peuvent être amenés à coopérer sur une même tâche de manière séquentielle. Les mouvements de signalisation du robot doivent communiquer à propos de son état et des actions qu'il partage avec l'opérateur. Ils ont pour rôle de maintenir l'humain dans la boucle d'action du robot en l'empêchant notamment de tunnéliser son attention sur sa propre tâche. En cela, ils maintiennent son niveau de sécurité et soutiennent sa performance à la tâche. Cependant, le robot ne doit pas gêner l'opérateur dans la réalisation de sa tâche. Les moments de communication doivent donc être correctement choisis en accord avec les moments de disponibilités cognitive de l'opérateur.

(c) Dans le cas d'une collaboration, l'humain et le robot partagent un même espace de travail et une même tâche. Les mouvements de signalisation du robot doivent principalement concerner la tâche partagée par l'humain et le robot. L'opérateur doit pouvoir comprendre et projeter les actions de son partenaire robotique pendant la tâche. Il convient ici de s'inspirer de la théorie de l'action jointe (section 1.2) afin de coordonner le travail d'équipe et favoriser les prédictions d'actions des partenaires.

2. **La dynamique de la tâche** : il s'agit du deuxième élément dont il faut tenir compte dans la conception d'un mouvement de signalisation. Ce dernier doit, dans la mesure du possible, rompre avec la dynamique courante des mouvements du robot. Afin d'être saillant, il est important que le mouvement de communication ne puisse pas être confondu avec un mouvement que le robot pourrait effectuer pour réaliser une de ses tâches. Cela peut être fait de plusieurs manières en jouant sur les différentes composantes du mouvement du robot afin de les différencier de ceux réalisés pour la tâche.
3. **Le choix du mouvement et de sa dynamique** : c'est le troisième élément à considérer pour s'assurer d'une communication saillante. D'abord le choix du mouvement doit être en accord avec la signification du message à transmettre. Ce mouvement peut être doté de caractéristiques anthropomorphique afin de favoriser la compréhension de son sens. Ce choix peut aussi être appuyé par le positionnement ou la vitesse du robot. Par le positionnement, le robot peut communiquer une intention d'action ou une demande d'assistance à son partenaire. Un mouvement rapide aura tendance à être perçu plus rapidement par le partenaire humain et occasionnera une réponse plus rapide. Pour autant, il faut tenir compte des effets de la perception d'un mouvement rapide sur le stress ou la charge cognitive et ne pas sur-exploiter cette composante.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons analysé les différents facteurs qui peuvent influencer la saillance d'un mouvement de signalisation généré par un robot collaboratif. Pour cela, nous nous sommes inspirés de la littérature et des différences conceptuelles entre les expérimentations présentées dans les chapitres 3 et 4 de ce manuscrit. L'objectif de ce chapitre était de mettre en évidence des recommandations pour guider les roboticiens et les communautés d'IHR et de CHR à implémenter des mouvements de signalisation sur des robots. Ce chapitre nous a permis de répondre à la question 5 :

Question 5

Quels sont les facteurs qui contribuent à rendre les mouvements de signalisation saillants et porteur de la signification prescrite ?

Nous avons commencé par rappeler les mouvements de signalisation mis en œuvre dans les deux expérimentations et l'influence qu'ils ont eu sur la CS des participants en section 5.1. Nous avons discuté de l'influence du mode d'interaction et de la disposition des agents dans l'environnement de travail sur la saillance des mouvements de signalisation dans la section 5.2. L'influence de la dynamique de l'environnement de travail, et notamment du robot, a ensuite été explorée dans la section 5.3. Ensuite, dans la section 5.4, nous nous sommes intéressés à l'influence du choix du mouvement et de sa signification ainsi que sa dynamique : la position, la vitesse et l'accélération. Enfin, dans la section 5.5, nous avons proposé des recommandations

de conception des mouvements de signalisation.

Pour l'heure, ce type de communication a été exploité avec des robots collaboratifs mais pourrait tout à fait s'exporter avec d'autres types de robots : industriels, sociaux, médicaux, etc. Il pourrait être intéressant d'étudier l'impact de ces mouvements de communication sur la CS de personnes dans d'autres contextes ou avec des robots d'aspect différent.

Une autre perspective à explorer serait de reproduire nos expérimentations en jouant sur les différentes composantes du mouvement, notamment la vitesse. En effet, il est possible que le mouvement de respiration du chapitre 4 eut été plus saillant si le robot avait déplacé plus rapidement ses articulations. Nous aurions pu alors observer des résultats expérimentaux autre que ceux obtenus dans notre étude. Aussi, dans le chapitre 3, il aurait convenu d'étudier l'influence de la vitesse du robot sur la distance de passage. Un robot plus rapide aurait peut-être renforcé nos résultats. À l'inverse, un mouvement de respiration plus lent aurait probablement diminué la vigilance des participants et les auraient conduits à prendre plus de risque en passant proche du robot.

Conclusion et perspectives

Table des matières

Conclusion	115
Perspectives	119

Conclusion

Au cours de ce manuscrit, intitulé « Exploitation du mouvement du robot pour améliorer la conscience de situation dans la collaboration humain-robot », nous avons essayé de répondre à plusieurs objectifs. La contribution principale de nos travaux de recherche réside dans la proposition des mouvements de signalisation en tant que moyen de communication non-verbale des robots. Ces mouvements sont une opportunité de fournir à des cobots un canal de communication supplémentaire sans pour autant entraver leur tâche principale. Dans le cadre de cette thèse, les mouvements de signalisation ont été mis en œuvre pour étudier leur influence sur la conscience de la situation (CS) dans la collaboration humain-robot (CHR).

Dans le chapitre 1, nous avons présenté un état de l'art des différentes thématiques nécessaire à la prise en compte de la conscience de la situation (CS) dans le cadre de la collaboration humain-robot (CHR). Cela nous a permis, d'une part, de poser le contexte théorique en lien avec les travaux du manuscrit et, d'autre part, de proposer une réponse à la question 1 :

Question 1

Comment modéliser la conscience de situation d'un humain afin qu'elle puisse être soutenue par les actions d'un robot dans le cadre de la collaboration humain-robot ?

Nous avons d'abord discuté de l'apport de la robotique collaborative dans les milieux industriels et de la volonté de faire travailler des robots aux côtés des humains. Cela nécessite de sécuriser les interactions tant du point de vue cognitif que physique tout en gardant à l'esprit des contraintes de performances à la tâche. Un moyen de concilier sécurité et performance est de s'inspirer de la théorie de l'action jointe. Le concept repose sur les capacités des individus à partager des représentations, prédire les actions et intégrer les effets prévus des actions de chaque individu. Dans le contexte de la CHR cela nécessite de donner aux robots collaboratifs des capacités sociales d'interaction, notamment de communication, pour partager des informations avec leur partenaires humains pendant des actions jointes. Nous avons ensuite présenté la CS en nous concentrant sur le modèle de Endsley (1995b) qui a guidé nos travaux de recherche. Il

nous paraît nécessaire pour un humain de disposer d’une bonne CS en vue de réaliser une action jointe. En effet, posséder une bonne CS implique que l’individu possède la capacité d’orienter ses prises de décisions en fonction de ses buts prédéfinis et de ses modèles mentaux construits à partir des informations perçues dans l’environnement. Pour finir, nous avons discuté des apports de la prise en compte de la CS dans l’IHR et la CHR. A l’aide de ces connaissances, et afin de répondre à la question 1, nous avons proposé un modèle de prise en compte de la conscience de situation par un robot dans le contexte de la CHR (voir figure 6.1).

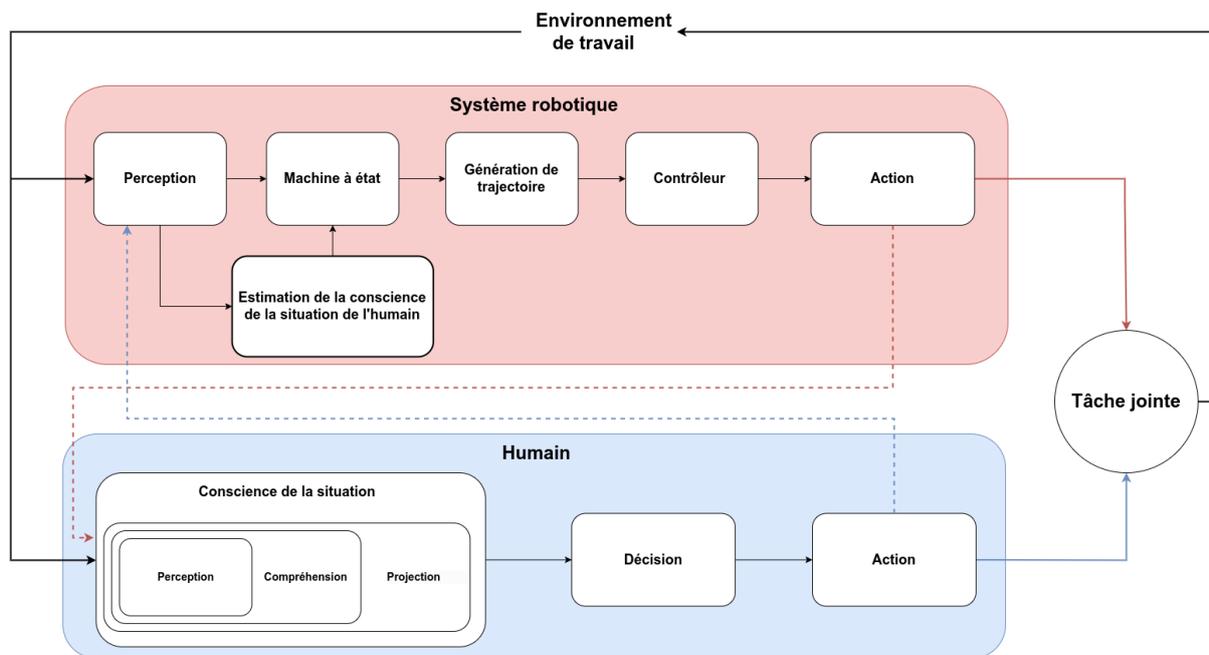


FIGURE 6.1 – Modèle de prise en compte de la conscience de situation par un robot proposé dans le chapitre 1.

Dans ce modèle, l’humain et le robot partagent un environnement de travail et participent conjointement à une tâche. La contribution principale réside dans le bloc « **Estimation de la conscience de situation de l’humain** ». Celle-ci peut se faire à partir des informations perçues : l’état de l’environnement, l’action de l’humain sur la tâche ou l’état courant de la tâche. Ces informations permettent au système robotique d’estimer la CS de l’humain. Cette estimation peut-être qualitative ou quantitative selon les méthodes de mesures à disposition. Une fois estimée, la CS est traitée comme une information supplémentaire fournie à la machine à état du système robotique. Elle vient ainsi influencer l’action réalisée par le robot afin de soutenir la CS de l’humain. Cette estimation permet d’une part d’évaluer la sécurité de l’opérateur et aussi de la soutenir si cela est nécessaire. Ce modèle soulève de nombreux questionnements à propos de la prise en compte de la CS dans le contexte de la CHR. Nous avons ainsi tentés d’y apporter des réponses dans les chapitres suivants.

Dans le chapitre 2, nous avons cherché à mettre en évidence les problèmes relatifs à la CS des opérateurs en interaction avec des robots dans les milieux industriels. Pour cela, nous avons analysé des rapports d’accidents de robotique industrielle issus de la base de données EPICEA de l’INRS. Ce travail a été valorisé par une publication dans un journal (Cambor et al., 2022b). A l’aide de cette analyse, nous avons souhaité répondre à la question 2 :

Question 2

Quels sont les facteurs de risques qui peuvent participer à la dégradation de la conscience de situation d'un opérateur en milieu industriel ?

Cette analyse suggère que les démons de la CS sont les principaux responsables de la dégradation de la CS des opérateurs dans les accidents de robotique industrielle. Nous avons proposé d'analyser les rapports d'accidents de robotique industrielle en utilisant les démons de la conscience de la situation (CS) comme grille de lecture. Cette analyse a mis en évidence qu'un manque de CS des opérateurs était responsable des erreurs menant aux accidents. Nos résultats ont montrés l'apparition de quatre des huit démons de la CS avant les accidents : le modèle mental errant, le syndrome hors de la boucle, la tunnélisation attentionnelle et la saillance inappropriée. Nous avons mis en évidence trois schémas systématiques d'accidents. Chacun de ces schémas est caractérisé par la manifestation d'un ou plusieurs des quatre démons de la CS. Un point important des schémas d'accidents exposés concernait le manque de saillance de l'information. Nous avons alors fait l'hypothèse que la principale raison du manque de CS des opérateurs et de l'apparition des démons de la CS est une mauvaise utilisation des moyens de communication dans l'environnement de travail.

Cette analyse nous a mené à considérer l'utilisation du robot en tant que moyen de communication à l'aide de ses mouvements dans le chapitre 3. Ce choix a été motivé par le fait que le robot est souvent la source principale de danger dans l'environnement de travail. En cela, l'opérateur serait alors plus vigilant vis-à-vis du robot et son attention ne serait pas détournée vers un système ou une interface supplémentaire destinée à la communication. Cela contribuerait à rendre les robots collaboratifs plus transparents vis-à-vis de leurs partenaires d'interaction. Ce travail a été valorisé par une publication et une communication orale dans une conférence (Cambor et al., 2022a). Ce chapitre répond à la question 3 :

Question 3

La communication d'un robot à l'aide de ses mouvements permet-elle d'améliorer la conscience de situation d'un humain avec qui il interagit ?

Nous avons répondu positivement à cette question en introduisant le concept de mouvement de signalisation en tant que moyen de communication non-verbale du robot. Ces mouvements sont considérés comme un moyen de soutenir les interactions d'un robot collaboratif avec un humain en renforçant sa CS. Le point fort de ce type de mouvements réside dans le fait qu'ils permettent au robot de réaliser des tâches tout en communiquant grâce à la redondance de leurs articulations. Nous les avons déclinés en deux types : les mouvements de signalisation d'actions, qui informent à propos de la tâche du robot, et les mouvements de signalisation d'états, qui informent à propos de l'état courant du robot. Nous avons proposé une expérimentation dans laquelle nous avons vérifié l'effet de deux de ces mouvements sur la CS de participants. Dans cette expérimentation, les participants devaient collaborer avec un cobot (Cobot 1) pour réaliser une tâche de simulation cobotisée de découpe de bois. Pendant la tâche, le robot générait un mouvement de fléchissement (mouvement de signalisation d'action) informant l'opérateur de la résistance générée par le robot. Un deuxième cobot (Cobot 2) était présent dans l'environnement de travail. Ce dernier pouvait être actif (en mouvement) ou en attente. Lorsqu'il était en attente, le robot restait immobile ou il faisait un mouvement de respiration (mouvement de signalisation

d'état). Ce mouvement de signalisation avait pour but d'informer l'opérateur de l'activité du robot et d'une potentielle reprise des mouvements. Les deux mouvements de signalisation mis en place ont permis d'éviter deux des trois schémas systématiques d'accidents obtenus dans le chapitre 2. Nos résultats ont montré que les deux mouvements de signalisation ont contribué à soutenir le modèle mental des participants au cours de la tâche et dans l'environnement de travail. Aussi, le mouvement de fléchissement a permis de les maintenir dans la boucle d'action du robot. Plus précisément, le mouvement a permis aux opérateurs de projeter l'action du robot avant de réaliser leur propre action.

Pendant l'expérimentation du chapitre 3, il n'était pas possible d'anticiper la résistance produite par le robot sans qu'il ne génère un mouvement de signalisation. Cela nous a conduit à nous interroger sur le rôle de la capacité de projection (niveau 3 de la CS) sur l'effet des mouvements de signalisation dans le chapitre 4. Aussi, l'humain et le robot générant le mouvement de signalisation de fléchissement était en situation de collaboration : ils partageaient le même espace de travail et une tâche commune en se trouvant l'un en face de l'autre. Ainsi, dans le chapitre 4, nous nous sommes aussi intéressés à l'effet des mouvements de signalisation dans le cas où le partenaire humain concentre son attention sur une tâche et doit occasionnellement coopérer avec un robot collaboratif sur une autre tâche. Ce travail a été valorisé par une publication dans un journal (Cambor et al., 2024). Cela nous a permis de répondre à la question 4 :

Question 4

Les mouvements de signalisation d'un robot permettent-ils d'extraire un humain d'un état de tunnélisation attentionnelle et d'atténuer son manque de capacité de projection dans un scénario de coopération humain-robot ?

La réponse apportée à la question 4 est plus nuancée. Nous avons proposé un protocole expérimental dans lequel les participants devaient jouer au jeu des tours de Hanoi et assister un robot dans une tâche d'assemblage. Le jeu des tours de Hanoi avait pour but de tunnéliser l'attention des participants sur une tâche autre que celle faite en coopération avec le robot. Le protocole permettait également d'étudier l'influence des capacités de projection sur le partage d'attention des personnes. L'assistance pouvait se faire de deux manières : donner au robot une pièce à assembler ou retirer les assemblages terminés par le robot. L'action de don ne pouvait pas être anticipée par les participants contrairement à celle de retrait. Cela nous a permis de vérifier l'effet d'un mouvement de signalisation, la respiration, lorsque la capacité de projection des participants était entravée ou non. Dans ce chapitre, le mouvement de respiration indiquait aux participants que le robot était en état d'attente d'une action d'assistance de leur part. Les résultats expérimentaux ont montrés des temps de réaction plus court pour assister le robot lorsqu'ils pouvaient projeter sa prochaine action (retrait). En revanche, nos résultats ne nous ont pas permis de conclure quant à la capacité du mouvement de respiration à dé-tunnéliser les participants de la tâche de Hanoi. D'après nos données, il semblerait que l'arrêt des mouvements du robot a été plus saillant que la respiration pour attirer l'attention du participant vers le robot lorsque ce dernier nécessitait une assistance dans sa tâche. Ces résultats nous ont amenés à considérer l'immobilité, ou l'arrêt, du mouvement du robot comme un moyen de communication non-verbale du robot et, par extension, comme un mouvement de signalisation supplémentaire.

Suite à ce résultat, dans le chapitre 5, nous nous sommes questionnés sur les facteurs qui ont eu une influence sur la saillance des mouvements de signalisation. A l'aide de la littérature et des

différences conceptuelles entre nos deux expérimentations, nous avons répondu à la question 5.

Question 5

Quels sont les facteurs qui contribuent à rendre les mouvements de signalisation saillants et porteur de la signification prescrite ?

L'objectif du chapitre 5 était d'étudier les différents facteurs qui ont contribué, ou non, à rendre les mouvements de signalisation saillants. Nous avons d'abord rappelé les mouvements de signalisation mis en œuvre dans les deux expérimentations présentées dans le manuscrit et l'influence qu'ils ont eu sur la CS des participants. Nous avons notamment discuté de l'influence du mode d'interaction sur la saillance des mouvements de signalisation. Nous nous sommes rendus compte que les différents modes d'interaction avaient une influence sur l'attention portée par les personnes envers le cobot. Aussi, l'influence de la dynamique de l'environnement de travail, et notamment du robot, a par la suite été questionnée. Il semblerait que les mouvements de signalisation soient mieux perçus et compris lorsque ces derniers rompent avec la dynamique habituelle du robot. Enfin, nous nous sommes intéressés à l'influence du choix du mouvement et de sa signification en tant que dernier facteur influençant la saillance. En particulier, les différents paramètres cinématiques, à savoir la position, la vitesse et l'accélération, semblent eux aussi participer à rendre les mouvements de signalisation plus saillants. Pour finir, nous avons proposé des recommandations pour guider les roboticiens et les communautés d'IHR et de CHR afin d'implémenter des mouvements de signalisation appropriés.

Perspectives

L'exploitation des mouvements d'un robot comme moyen de communication et la prise en compte de la conscience de la situation (CS) dans la collaboration humain-robot (CHR) sont des thématiques de recherches dans lesquelles il reste de nombreux axes à développer. Les travaux présentés dans ce manuscrit sont un premier pas vers de nombreuses possibilités et questions à explorer.

Une première perspective de travail futur concerne la proposition de protocoles expérimentaux qui étudieraient de nouveaux mouvements de signalisation ou les effets de la dynamique du robot sur la perception d'un mouvement de signalisation. Comme nous avons pu le voir dans le chapitre 5, les différentes composantes de la dynamique du robot (position, vitesse et accélération) contribuent à la saillance des mouvements de signalisation. Le protocole expérimental présenté dans le chapitre 4 pourrait servir de base à ce nouveau protocole. En modifiant les profils de vitesse ou d'accélération, nous pourrions ainsi évaluer leur influence sur la rapidité de perception du mouvement de signalisation mais aussi sur le ressenti des individus à propos du mouvement du robot. Modifier l'amplitude de mouvement du robot pourrait aussi être un moyen de soutenir la perception du robot. Ces expérimentations permettraient de connaître plus précisément dans quelles circonstances modifier la vitesse ou l'accélération du robot pour correctement communiquer avec le partenaire humain et favoriser son confort. Cela pourrait se faire en quantifiant la vitesse de manière à en déduire une plage de valeurs adaptée à la perception et la bonne compréhension des mouvements de signalisation. Une contribution de ce travail serait de renforcer les recommandations de conception des mouvements de signalisation comme présentées dans le chapitre 5. À plus long terme, ces travaux mèneraient à la création d'un lexique de mouvements de signalisation. Ce dernier pourrait fournir des types de mouvements adaptés

à des situations ou des informations à transmettre. Ce lexique pourrait s'inspirer des travaux de recherches existants sur les mouvements (anthropomorphiques ou non), la transparence des robots, etc.

Une seconde perspective en lien avec les travaux de cette thèse serait de comparer l'efficacité des mouvements de signalisation avec d'autres modalités de communication du robot vers l'humain. Comme nous l'avons vu dans les chapitres 1 et 3, les robots disposent de plusieurs canaux de communication comme des signaux visuels (textes ou lumière) ou sonores (alarmes). Il serait alors intéressant de confronter différents modes de communication du robot dans un protocole expérimental. Là encore, le protocole expérimental du chapitre 4 pourrait être ré-utilisé dans ce but. Le protocole du chapitre 3 s'avérerait lui aussi approprié, notamment dans le cas de la coexistence avec le Cobot 2 qui effectuait un mouvement de respiration. Les résultats de ces travaux apporteraient des précisions à propos de la pertinence des mouvements de signalisation pour communiquer des informations et soutenir la CS des partenaires humains. L'interaction pourrait aussi être évaluée d'un point de vue hédonique afin de tenir compte des préférences de communication des utilisateurs. Il ne s'agit pas de vérifier l'efficacité des mouvements de signalisation en comparaison avec d'autres moyens de communication mais plutôt leur efficacité pour transmettre un message approprié.

Une troisième perspective concerne l'estimation de la conscience de la situation en temps réel. Cependant, il est important de garder à l'esprit qu'il est compliqué d'évaluer précisément la CS d'un individu. En effet, cette dernière est un processus cognitif complexe qui dépend elle-même d'autres processus cognitifs comme les représentations mentales, la mémoire, l'attention, l'expertise, etc. C'est pourquoi nous préférons parler d'une estimation et non pas d'une évaluation. Les données oculométriques (fixations, saccades, taille de la pupille, zone d'intérêts, rotation de la tête, etc.) obtenues lors des travaux du chapitre 4 pourraient nous permettre une évaluation en temps réel. A l'aide de ces données, il serait par exemple possible de détecter une potentielle tunnélisation de l'attention du partenaire humain. Le robot pourrait ainsi adapter son comportement et communiquer à son partenaire humain un besoin imminent d'intervention ou utiliser une mesure de dé-tunnélisation. Un autre moyen de faire cette estimation serait de considérer que l'action faite par un individu est le résultat de sa CS et donc, comparer cette action à l'action attendue à un instant t serait un autre moyen d'estimer sa CS.

Pour finir, une dernière perspective concerne le fait de générer les mouvements de signalisation de manière réactive à des défauts de CS détectés. Jusqu'à présent, nos travaux ne tenaient pas compte de la CS réelle des participants au cours des expériences. Ainsi, les mouvements de signalisation étaient générés arbitrairement quelle que soit la CS des individus. Cela reviendrait à intégrer les mouvements de signalisation comme des actions possibles du robot lors d'une tâche jointe. L'avantage de leur conception fait qu'il serait possible de les superposer à l'action du robot sur la tâche. Cette solution réactive pourrait se faire grâce à des processus de décision markovien et plus particulièrement des processus de décision markovien partiellement observable (Partially Observable Markov Decision Process - POMDP) (Kurniawati, 2022; Spaan, 2012). Ce type de processus permet une prise de décision optimale dans des environnements qui ne sont que partiellement observables pour l'agent (Spaan, 2012). Ils ont récemment été utilisés pour la planification de tâche d'un robot selon la confiance, estimée, accordée à un robot par un humain dans des scénarios de CHR (Chen et al., 2018b, 2020). Dans notre cas, l'information partiellement observable de l'état courant correspondrait à la CS des individus. Cette proposition pourrait être renforcée à l'aide de la perspective précédente à propos de l'estimation de la CS en temps réel.

Bibliographie

- Henny Admoni, Caroline Bank, Joshua Tan, Mariya Toneva, and Brian Scassellati. Robot gaze does not reflexively cue human attention. In *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, volume 33, 2011.
- Henny Admoni, Anca Dragan, Siddhartha S Srinivasa, and Brian Scassellati. Deliberate delays during robot-to-human handovers improve compliance with gaze communication. In *Proceedings of the 2014 ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction*, pages 49–56, 2014.
- Henny Admoni, Thomas Weng, Bradley Hayes, and Brian Scassellati. Robot nonverbal behavior improves task performance in difficult collaborations. In *2016 11th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pages 51–58. IEEE, 2016.
- Fereydoun Aghazadeh, Robert Hirschfeld, and Robert Chapleski. Industrial robot use : survey results and hazard analysis. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 37-14, pages 994–998. SAGE Publications Sage CA : Los Angeles, CA, 1993.
- Arash Ajoudani, Sasha B Godfrey, Matteo Bianchi, Manuel G Catalano, Giorgio Grioli, Nikos Tsagarakis, and Antonio Bicchi. Exploring teleimpedance and tactile feedback for intuitive control of the pisa/iit soft hand. *IEEE transactions on haptics*, 7(2) :203–215, 2014.
- Arash Ajoudani, Andrea Maria Zanchettin, Serena Ivaldi, Alin Albu-Schäffer, Kazuhiro Kose, and Oussama Khatib. Progress and prospects of the human–robot collaboration. *Autonomous Robots*, 42 :957–975, 2018.
- Nicolas Torres Alberto, Antun Skuric, Lucas Joseph, Vincent Padois, and David Daney. Model predictive control for robots adapting their task space motion online. 2023.
- Pourya Aliasghari, Moojan Ghafurian, Chrystopher L Nehaniv, and Kerstin Dautenhahn. Effects of gaze and arm motion kinesics on a humanoid’s perceived confidence, eagerness to learn, and attention to the task in a teaching scenario. In *Proceedings of the 2021 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pages 197–206, 2021.
- Victoria Alonso and Paloma De La Puente. System transparency in shared autonomy : A mini review. *Frontiers in neurorobotics*, 12 :83, 2018.
- Rasmus S Andersen, Ole Madsen, Thomas B Moeslund, and Heni Ben Amor. Projecting robot intentions into human environments. In *2016 25th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, pages 294–301. IEEE, 2016.

- Tamio Arai, Ryu Kato, and Marina Fujita. Assessment of operator stress induced by robot collaboration in assembly. *CIRP annals*, 59(1) :5–8, 2010.
- Michael Argyle. *Bodily communication*. Routledge, 2013.
- Thomas Arnold and Matthias Scheutz. Observing robot touch in context : How does touch and attitude affect perceptions of a robot’s social qualities? In *Proceedings of the 2018 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pages 352–360, 2018.
- Thibault Asselborn, Wafa Johal, and Pierre Dillenbourg. Keep on moving ! exploring anthropomorphic effects of motion during idle moments. In *2017 26th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, pages 897–902. IEEE, 2017.
- Kim Baraka, Ana Paiva, and Manuela Veloso. Expressive lights for revealing mobile service robot state. In *Robot 2015 : Second Iberian Robotics Conference : Advances in Robotics, Volume 1*, pages 107–119. Springer, 2016.
- Simon Baron-Cohen. Precursors to a theory of mind : Understanding attention in others. *Natural theories of mind : Evolution, development and simulation of everyday mindreading*, 1 :233–251, 1991.
- Christoph Bartneck, Tony Belpaeme, Friederike Eyssel, Takayuki Kanda, Merel Keijsers, and Selma Šabanović. *Human-robot interaction : An introduction*. Cambridge University Press, 2020.
- Andrea Bauer, Dirk Wollherr, and Martin Buss. Human–robot collaboration : a survey. *International Journal of Humanoid Robotics*, 5(01) :47–66, 2008.
- Wilhelm Bauer, Manfred Bender, Martin Braun, PETER Rally, and Oliver Scholtz. Lightweight robots in manual assembly–best to start simply. *Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, Stuttgart*, 1, 2016.
- Cristina Becchio, Luisa Sartori, and Umberto Castiello. Toward you : The social side of actions. *Current Directions in Psychological Science*, 19(3) :183–188, 2010.
- Kathleen Belhassein, Víctor Fernández-Castro, Amandine Mayima, Aurélie Clodic, Elisabeth Pacherie, Michèle Guidetti, Rachid Alami, and Hélène Cochet. Addressing joint action challenges in hri : Insights from psychology and philosophy. *Acta Psychologica*, 222 :103476, 2022.
- Nassim Benhabib, Vincent Padois, and David Daney. Securing industrial operators with collaborative robots : Simulation and experimental validation for a carpentry task. In *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 7128–7134. IEEE, 2020.
- Nassim Benhabib, Vincent Padois, and David Daney. An approach to quantify manual expertise with collaborative robotics in mind. 2021.
- Alain Berthoz. *Le sens du mouvement*. Odile Jacob, 1997.
- Brian T Bethea, Allison M Okamura, Masaya Kitagawa, Torin P Fitton, Stephen M Cattaneo, Vincent L Gott, William A Baumgartner, and David D Yuh. Application of haptic feedback

- to robotic surgery. *Journal of Laparoendoscopic & Advanced Surgical Techniques*, 14(3) : 191–195, 2004.
- Andrea Bonarini. Communication in human-robot interaction. *Current Robotics Reports*, pages 1–7, 2020.
- Stuart A Bowyer, Brian L Davies, and Ferdinando Rodriguez y Baena. Active constraints/virtual fixtures : A survey. *IEEE Transactions on Robotics*, 30(1) :138–157, 2013.
- Bethany Bracken, Sean Tobbyne, Aaron Winder, Nina Shamsi, and Mica R Endsley. Can situation awareness be measured physiologically? In *Advances in Neuroergonomics and Cognitive Engineering : Proceedings of the AHFE 2021 Virtual Conferences on Neuroergonomics and Cognitive Engineering, Industrial Cognitive Ergonomics and Engineering Psychology, and Cognitive Computing and Internet of Things, July 25-29, 2021, USA*, pages 31–38. Springer, 2021.
- Michael E Bratman. Shared cooperative activity. *The philosophical review*, 101(2) :327–341, 1992.
- Cynthia Breazeal. *Designing sociable robots*. MIT press, 2004.
- Cynthia Breazeal, Cory D Kidd, Andrea Lockerd Thomaz, Guy Hoffman, and Matt Berlin. Effects of nonverbal communication on efficiency and robustness in human-robot teamwork. In *2005 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems*, pages 708–713. IEEE, 2005.
- Cynthia Breazeal, Kerstin Dautenhahn, and Takayuki Kanda. Social robotics. *Springer handbook of robotics*, pages 1935–1972, 2016.
- Moritz C Buehler and Thomas H Weisswange. Online inference of human belief for cooperative robots. In *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 409–415. IEEE, 2018.
- Janet Elizabeth Cahn. *Generating expression in synthesized speech*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1989.
- Benjamin Camblor, Nassim Benhabib, David Daney, Vincent Padois, and Jean-Marc Salotti. Task-consistent signaling motions for improved understanding in human-robot interaction and workspace sharing. In *2022 17th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pages 275–283. IEEE, 2022a.
- Benjamin Camblor, Jean-Marc Salotti, Charles Fage, and David Daney. Degraded situation awareness in a robotic workspace : accident report analysis. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 23(1) :60–79, 2022b.
- Benjamin Camblor, David Daney, Lucas Joseph, and Jean-Marc Salotti. Attention sharing handling through projection capability within human–robot collaboration. *International Journal of Social Robotics*, pages 1–18, 2024.
- Malinda Carpenter. Just how joint is joint action in infancy? *Topics in Cognitive Science*, 1(2) : 380–392, 2009.
- Elizabeth Cha and Maja Matarić. Using nonverbal signals to request help during human-robot

- collaboration. In *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 5070–5076. IEEE, 2016.
- Elizabeth Cha, Tushar Trehon, Lancelot Wathieu, Christian Wagner, Anurag Shukla, and Maja J Matarić. Modlight : designing a modular light signaling tool for human-robot interaction. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 1654–1661. IEEE, 2017.
- Elizabeth Cha, Yunkyung Kim, Terrence Fong, Maja J Mataric, et al. A survey of nonverbal signaling methods for non-humanoid robots. *Foundations and Trends® in Robotics*, 6(4) : 211–323, 2018.
- Tathagata Chakraborti, Anagha Kulkarni, Sarath Sreedharan, David E Smith, and Subbarao Kambhampati. Explicability ? legibility ? predictability ? transparency ? privacy ? security ? the emerging landscape of interpretable agent behavior. In *Proceedings of the international conference on automated planning and scheduling*, volume 29, pages 86–96, 2019.
- P Charpentier and A Sghaier. Industrial robotic : Accident analysis and human-robot coactivity. In *Proceedings of the 7th International Conference on the Safety of Industrial Automated Systems, SIAS*, pages 11–12, 2012.
- Jessie Y Chen, Katelyn Procci, Michael Boyce, Julia Wright, Andre Garcia, and Michael Barnes. Situation awareness-based agent transparency. *US Army Research Laboratory*, pages 1–29, 2014.
- Jessie YC Chen, Shan G Lakhmani, Kimberly Stowers, Anthony R Selkowitz, Julia L Wright, and Michael Barnes. Situation awareness-based agent transparency and human-autonomy teaming effectiveness. *Theoretical issues in ergonomics science*, 19(3) :259–282, 2018a.
- Min Chen, Stefanos Nikolaidis, Harold Soh, David Hsu, and Siddhartha Srinivasa. Planning with trust for human-robot collaboration. In *Proceedings of the 2018 ACM/IEEE international conference on human-robot interaction*, pages 307–315, 2018b.
- Min Chen, Stefanos Nikolaidis, Harold Soh, David Hsu, and Siddhartha Srinivasa. Trust-aware decision making for human-robot collaboration : Model learning and planning. *ACM Transactions on Human-Robot Interaction (THRI)*, 9(2) :1–23, 2020.
- Tiffany L Chen, Chih-Hung King, Andrea L Thomaz, and Charles C Kemp. Touched by a robot : An investigation of subjective responses to robot-initiated touch. In *Proceedings of the 6th international conference on Human-robot interaction*, pages 457–464, 2011.
- Dan L Chiappe, Thomas Z Strybel, and Kim-Phuong L Vu. Mechanisms for the acquisition of situation awareness in situated agents. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 13(6) : 625–647, 2012.
- Stefano Chiaverini. Redundant robots. In *Encyclopedia of Systems and Control*, pages 1836–1844. Springer, 2021.
- Vijay Chidambaram, Yueh-Hsuan Chiang, and Bilge Mutlu. Designing persuasive robots : how robots might persuade people using vocal and nonverbal cues. In *Proceedings of the seventh annual ACM/IEEE international conference on Human-Robot Interaction*, pages 293–300, 2012.

- Herbert H Clark. Coordinating with each other in a material world. *Discourse studies*, 7(4-5) : 507–525, 2005.
- Aurélie Clodic, Elisabeth Pacherie, Rachid Alami, and Raja Chatila. Key elements for human-robot joint action. *Sociality and normativity for robots : philosophical inquiries into human-robot interactions*, pages 159–177, 2017.
- Philip R Cohen and Hector J Levesque. Teamwork. *Nous*, 25(4) :487–512, 1991.
- J Edward Colgate, Witaya Wannasuphoprasit, and Michael A Peshkin. Cobots : Robots for collaboration with human operators. In *ASME 1996 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, pages 433–439. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 1996.
- Jessica Colombel. *Analyse du mouvement humain pour l'assistance à la personne : apport de la robustesse de l'observation et de l'analyse par contrôle optimal inverse*. PhD thesis, Université de Lorraine, 2022.
- Henriette SM Cramer, Nicander A Kemper, Alia Amin, and Vanessa Evers. The effects of robot touch and proactive behaviour on perceptions of human-robot interactions. In *Proceedings of the 4th ACM/IEEE international conference on Human robot interaction*, pages 275–276, 2009.
- Raymond H Cuijpers and Marco AMH Knops. Motions of robots matter ! the social effects of idle and meaningful motions. In *International Conference on Social Robotics*, pages 174–183. Springer, 2015.
- Arianna Curioni, Gunther Knoblich, Natalie Sebanz, A Goswami, and P Vadakkepat. Joint action in humans : A model for human-robot interactions. *Humanoid robotics : A reference*, pages 2149–2167, 2019.
- James E Cutting and Lynn T Kozlowski. Recognizing friends by their walk : Gait perception without familiarity cues. *Bulletin of the psychonomic society*, 9 :353–356, 1977.
- Alessandro De Luca and Fabrizio Flacco. Integrated control for phri : Collision avoidance, detection, reaction and collaboration. In *2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, pages 288–295. IEEE, 2012.
- Ewart J De Visser, Samuel S Monfort, Ryan McKendrick, Melissa AB Smith, Patrick E McKnight, Frank Krueger, and Raja Parasuraman. Almost human : Anthropomorphism increases trust resilience in cognitive agents. *Journal of Experimental Psychology : Applied*, 22(3) : 331, 2016.
- Joost CF de Winter, Yke Bauke Eisma, CDD Cabrall, Peter A Hancock, and Neville A Stanton. Situation awareness based on eye movements in relation to the task environment. *Cognition, Technology & Work*, 21(1) :99–111, 2019.
- Frédéric Dehais, Emrah Akin Sisbot, Rachid Alami, and Mickaël Causse. Physiological and subjective evaluation of a human–robot object hand-over task. *Applied ergonomics*, 42(6) : 785–791, 2011.
- Daniel C Dennett. *Consciousness in human and robot minds*. Oxford University Press, 1997.

- Arnaud Desvergez, Arnaud Winer, Jean-Bernard Gouyon, and Médéric Descoins. An observational study using eye tracking to assess resident and senior anesthetists' situation awareness and visual perception in postpartum hemorrhage high fidelity simulation. *PloS one*, 14(8) : e0221515, 2019.
- Sandra Devin and Rachid Alami. An implemented theory of mind to improve human-robot shared plans execution. In *2016 11th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pages 319–326. IEEE, 2016.
- BS Dhillon. Robot reliability. In *Robot Reliability and Safety*, pages 119–149. Springer, 1991.
- Amir Dini, Cornelia Murko, Saeed Yahyanejad, Ursula Augsdörfer, Michael Hofbaur, and Lucas Paletta. Measurement and prediction of situation awareness in human-robot interaction based on a framework of probabilistic attention. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 4354–4361. IEEE, 2017.
- Nicola Diolaiti and Claudio Melchiorri. Teleoperation of a mobile robot through haptic feedback. In *IEEE International Workshop HAVE Haptic Virtual Environments and Their*, pages 67–72. IEEE, 2002.
- Winand H Dittrich, Tom Troscianko, Stephen EG Lea, and Dawn Morgan. Perception of emotion from dynamic point-light displays represented in dance. *Perception*, 25(6) :727–738, 1996.
- Anca D Dragan, Kenton CT Lee, and Siddhartha S Srinivasa. Legibility and predictability of robot motion. In *2013 8th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pages 301–308. IEEE, 2013.
- Anca D Dragan, Shira Bauman, Jodi Forlizzi, and Siddhartha S Srinivasa. Effects of robot motion on human-robot collaboration. In *2015 10th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pages 51–58. IEEE, 2015.
- Daniel Dreyer, Matthias Oberhauser, and Daniel Badow. Hud symbology evaluation in a virtual reality flight simulation. In *Proceedings of the International Conference on Human-Computer Interaction in Aerospace*, pages 1–6, 2014.
- Brian R Duffy. Anthropomorphism and the social robot. *Robotics and autonomous systems*, 42 (3-4) :177–190, 2003.
- Iveta Eimontaite, David Cameron, Joe Rolph, Saeid Mokaram, Jonathan M Aitken, Ian Gwilt, and James Law. Dynamic graphical instructions result in improved attitudes and decreased task completion time in human-robot co-working : an experimental manufacturing study. *Sustainability*, 14(6) :3289, 2022.
- Paul Ekman and Wallace V Friesen. The repertoire of nonverbal behavior : Categories, origins, usage, and coding. *semiotica*, 1(1) :49–98, 1969.
- Shirine El Zaatari, Mohamed Marei, Weidong Li, and Zahid Usman. Cobot programming for collaborative industrial tasks : An overview. *Robotics and Autonomous Systems*, 116 :162–180, 2019.
- Mica R Endsley. Design and evaluation for situation awareness enhancement. In *Proceedings of*

- the Human Factors Society annual meeting*, volume 32-2, pages 97–101. SAGE Publications Sage CA : Los Angeles, CA, 1988a.
- Mica R Endsley. Situation awareness global assessment technique (sagat). In *Proceedings of the IEEE 1988 national aerospace and electronics conference*, pages 789–795. IEEE, 1988b.
- Mica R Endsley. Measurement of situation awareness in dynamic systems. *Human factors*, 37(1) :65–84, 1995a.
- Mica R Endsley. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human factors*, 37(1) :32–64, 1995b.
- Mica R Endsley. A model of inter-and intrateam situation awareness : Implications for design, training, and measurement. *New trends in cooperative activities : Understanding system dynamics in complex environments*, pages 46–67, 2001.
- Mica R Endsley. *Designing for situation awareness : An approach to user-centered design*. CRC press, 2016.
- Mica R Endsley. From here to autonomy : lessons learned from human–automation research. *Human factors*, 59(1) :5–27, 2017.
- Mica R Endsley. Automation and situation awareness. In *Automation and human performance : Theory and applications*, pages 163–181. CRC Press, 2018.
- Mica R Endsley. The divergence of objective and subjective situation awareness : A meta-analysis. *Journal of cognitive engineering and decision making*, 14(1) :34–53, 2020.
- Mica R Endsley and Daniel J Garland. *Situation awareness analysis and measurement*. CRC press, 2000.
- Mica R Endsley and William M Jones. Situation awareness, information dominance, and information warfare. *Wright-Patterson AFB, OH : United States Air Force Armstrong Laboratory*, 1997.
- Mica R Endsley and Mark D Rodgers. Attention distribution and situation awareness in air traffic control. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*, volume 40, pages 82–85. SAGE Publications Sage CA : Los Angeles, CA, 1996.
- Mica R Endsley, Stephen J Selcon, Thomas D Hardiman, and Darryl G Croft. A comparative analysis of sagat and sart for evaluations of situation awareness. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*, volume 42-1, pages 82–86. SAGE Publications Sage CA : Los Angeles, CA, 1998.
- Mica R Endsley, Daniel J Garland, et al. Theoretical underpinnings of situation awareness : A critical review. *Situation awareness analysis and measurement*, 1(1) :3–21, 2000.
- Adrien Escande, Nicolas Mansard, and Pierre-Brice Wieber. Hierarchical quadratic programming : Fast online humanoid-robot motion generation. *The International Journal of Robotics Research*, 33(7) :1006–1028, 2014.
- Anika Fiebich and Shaun Gallagher. Joint attention in joint action. *Philosophical Psychology*, 26(4) :571–587, 2013.

- Kerstin Fischer, Bianca Soto, Caroline Pantofaru, and Leila Takayama. Initiating interactions in order to get help : Effects of social framing on people’s responses to robots’ requests for assistance. In *The 23rd IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pages 999–1005. IEEE, 2014.
- Fabrizio Flacco, Torsten Kröger, Alessandro De Luca, and Oussama Khatib. A depth space approach to human-robot collision avoidance. In *2012 IEEE international conference on robotics and automation*, pages 338–345. IEEE, 2012.
- Alexandra Frischen and Steven P Tipper. Orienting attention via observed gaze shift evokes longer term inhibitory effects : implications for social interactions, attention, and memory. *Journal of Experimental Psychology : General*, 133(4) :516, 2004.
- Chris Frith and Uta Frith. Theory of mind. *Current biology*, 15(17) :R644–R645, 2005.
- Thibault Gateau, Caroline P Carvalho Chanel, Mai-Huy Le, and Frédéric Dehais. Considering human’s non-deterministic behavior and his availability state when designing a collaborative human-robots system. In *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 4391–4397. IEEE, 2016.
- Michael J Gielniak and Andrea L Thomaz. Generating anticipation in robot motion. In *2011 RO-MAN*, pages 449–454. IEEE, 2011.
- Stefan Glasauer, Markus Huber, Patrizia Basili, Alois Knoll, and Thomas Brandt. Interacting in time and space : Investigating human-human and human-robot joint action. In *19th international symposium in robot and human interactive communication*, pages 252–257. IEEE, 2010.
- Matthew Gombolay, Anna Bair, Cindy Huang, and Julie Shah. Computational design of mixed-initiative human–robot teaming that considers human factors : situational awareness, workload, and workflow preferences. *The International journal of robotics research*, 36(5-7) : 597–617, 2017.
- Michael A Goodrich, Alan C Schultz, et al. Human–robot interaction : a survey. *Foundations and Trends® in Human–Computer Interaction*, 1(3) :203–275, 2008.
- Jamie C Gorman, Nancy J Cooke, and Jennifer L Winner. Measuring team situation awareness in decentralized command and control environments. In *Situational Awareness*, pages 183–196. Routledge, 2017.
- Julie Grèzes, Jorge L Armony, James Rowe, and Richard E Passingham. Activations related to “mirror” and “canonical” neurones in the human brain : an fmri study. *Neuroimage*, 18(4) : 928–937, 2003.
- Sami Haddadin and Elizabeth Croft. Physical human–robot interaction. *Springer handbook of robotics*, pages 1835–1874, 2016.
- Santoso Handri, Kuniaki Yajima, Shusaku Nomura, Nobuyuki Ogawa, Yoshimasa Kurosawa, and Yoshimi Fukumura. Evaluation of student’s physiological response towards e-learning courses material by using gsr sensor. In *2010 IEEE/ACIS 9th International Conference on Computer and Information Science*, pages 805–810. IEEE, 2010.
- Anjali Hans and Emmanuel Hans. Kinesics, haptics and proxemics : Aspects of non-verbal

- communication. *IOSR Journal of Humanities and Social Science (IOSR-JHSS)*, 20(2) :47–52, 2015.
- Sandra G Hart. Nasa-task load index (nasa-tlx) ; 20 years later. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*, volume 50-9, pages 904–908. Sage publications Sage CA : Los Angeles, CA, 2006.
- Sogand Hasanzadeh, Behzad Esmaceli, and Michael D Dodd. Examining the relationship between construction workers’ visual attention and situation awareness under fall and tripping hazard conditions : Using mobile eye tracking. *Journal of construction engineering and management*, 144(7) :04018060, 2018.
- Alice Haynes, Melanie F Simons, Tim Helps, Yuichi Nakamura, and Jonathan Rossiter. A wearable skin-stretching tactile interface for human–robot and human–human communication. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4(2) :1641–1646, 2019.
- Abdelfetah Hentout, Mustapha Aouache, Abderraouf Maoudj, and Isma Akli. Human–robot interaction in industrial collaborative robotics : a literature review of the decade 2008–2017. *Advanced Robotics*, 33(15-16) :764–799, 2019.
- Laura M Hiatt, Anthony M Harrison, and J Gregory Trafton. Accommodating human variability in human-robot teams through theory of mind. In *Twenty-Second International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 2011.
- Guy Hoffman. Evaluating fluency in human–robot collaboration. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 49(3) :209–218, 2019.
- Guy Hoffman and Wendy Ju. Designing robots with movement in mind. *Journal of Human-Robot Interaction*, 3(1) :91–122, 2014.
- Sarah K Hopko, Riya Khurana, Ranjana K Mehta, and Prabhakar R Pagilla. Effect of cognitive fatigue, operator sex, and robot assistance on task performance metrics, workload, and situation awareness in human-robot collaboration. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(2) : 3049–3056, 2021.
- Chien-Ming Huang and Bilge Mutlu. Modeling and evaluating narrative gestures for humanlike robots. In *Robotics : Science and Systems*, volume 2. Citeseer, 2013.
- Hiroshi Ishiguro and Fabio Dalla Libera. *Geminoid studies : Science and technologies for humanlike teleoperated androids*. Springer, 2018.
- ISO-10218-1. Robots and robotic devices-safety requirements for industrial robots-part 1 : Robots (iso 10218-1 : 2012). *International Organization for Standardization*, 2012.
- ISO-10218-2. Robots and robotic devices–safety requirements for industrial robots–part 2 : Robot systems and integration. *International Organization for Standardization*, 2011.
- ISO-15066. Robots and robotic devices—collaborative robots (iso-15066 : 2016). *International Organization for Standardization*, 2016.
- William James. *The principles of psychology*, volume 1. Cosimo, Inc., 2007.

- Michel Pierre Janisse. Pupillometry : The psychology of the pupillary response. (*No Title*), 1977.
- Eun-Sook Jee, Yong-Jeon Jeong, Chong Hui Kim, and Hisato Kobayashi. Sound design for emotion and intention expression of socially interactive robots. *Intelligent Service Robotics*, 3 :199–206, 2010.
- Bernard C Jiang and Charles A Gainer Jr. A cause-and-effect analysis of robot accidents. *Journal of Occupational accidents*, 9(1) :27–45, 1987.
- Debra G Jones and Mica R Endsley. Sources of situation awareness errors in aviation. *Aviation, space, and environmental medicine*, 1996.
- Lucas Joseph, Vincent Padois, and Guillaume Morel. Online minimization of the projected mass of a robot for safe workspace sharing with a human. In *Workshop on " Human movement science for physical human-robot collaboration" at the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2019.
- David B Kaber and Mica R Endsley. The effects of level of automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Theoretical issues in ergonomics science*, 5(2) :113–153, 2004.
- Waldemar Karwowski and Mansour Rahimi. Worker selection of safe speed and idle condition in simulated monitoring of two industrial robots. *Ergonomics*, 34(5) :531–546, 1991.
- Jon R Katzenbach and Douglas K Smith. *The wisdom of teams : Creating the high-performance organization*. Harvard Business Review Press, 2015.
- Harmish Khambhaita, Jorge Rios-Martinez, and Rachid Alami. Head-body motion coordination for human aware robot navigation. In *9th International workshop on Human-Friendly Robotics (HFR 2016)*, page 8p, 2016.
- Chih-Hung King, Martin O Culjat, Miguel L Franco, Catherine E Lewis, Erik P Dutson, Warren S Grundfest, and James W Bisley. Tactile feedback induces reduced grasping force in robot-assisted surgery. *IEEE transactions on haptics*, 2(2) :103–110, 2009.
- Tadashi Kitamura, Tomoko Tahara, and Ken-Ichi Asami. How can a robot have consciousness? *Advanced Robotics*, 14(4) :263–275, 2000.
- Mark L Knapp, Judith A Hall, and Terrence G Horgan. *Nonverbal communication in human interaction*. Cengage Learning, 2013.
- Ross A Knepper, Christoforos I Mavrogiannis, Julia Proft, and Claire Liang. Implicit communication in a joint action. In *Proceedings of the 2017 acm/ieee international conference on human-robot interaction*, pages 283–292, 2017.
- Günther Knoblich, Stephen Butterfill, and Natalie Sebanz. Psychological research on joint action : theory and data. *Psychology of learning and motivation*, 54 :59–101, 2011.
- Tobias Kopp, Marco Baumgartner, and Steffen Kinkel. Success factors for introducing industrial human-robot interaction in practice : an empirically driven framework. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112 :685–704, 2021.

- Markus Koppenborg, Peter Nickel, Birgit Naber, Andy Lungfiel, and Michael Huelke. Effects of movement speed and predictability in human–robot collaboration. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 27(4) :197–209, 2017.
- Robin SS Kramer, Isabel Arend, and Robert Ward. Perceived health from biological motion predicts voting behaviour. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 63(4) :625–632, 2010.
- Jan-Louis Kruger, Esté Hefer, and Gordon Matthew. Measuring the impact of subtitles on cognitive load : Eye tracking and dynamic audiovisual texts. In *Proceedings of the 2013 Conference on Eye Tracking South Africa*, pages 62–66, 2013.
- Dana Kulić and Elizabeth Croft. Physiological and subjective responses to articulated robot motion. *Robotica*, 25(1) :13–27, 2007.
- Shitij Kumar, Celal Savur, and Ferat Sahin. Survey of human–robot collaboration in industrial settings : Awareness, intelligence, and compliance. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics : Systems*, 51(1) :280–297, 2020.
- Hanna Kurniawati. Partially observable markov decision processes and robotics. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 5 :253–277, 2022.
- Sinem Kuz, C Schlick, G Lindgaard, and D Moore. Anthropomorphic motion control for safe and efficient human-robot cooperation in assembly system. In *Proceedings of the 19th Triennial Congress of the IEA*, volume 9, 2015.
- Xavier Lamy, Frédéric Colledani, Franck Geffard, Yvan Measson, and Guillaume Morel. Achieving efficient and stable comanipulation through adaptation to changes in human arm impedance. In *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 265–271. IEEE, 2009.
- Brenda Hiu Yan Law, Po-Yin Cheung, Sylvia van Os, Caroline Fray, and Georg M Schmölder. Effect of monitor positioning on visual attention and situation awareness during neonatal resuscitation : a randomised simulation study. *Archives of Disease in Childhood-Fetal and Neonatal Edition*, 105(3) :285–291, 2020.
- John K Layer, Waldemar Karwowski, and Allen Furr. The effect of cognitive demands and perceived quality of work life on human performance in manufacturing environments. *International journal of industrial ergonomics*, 39(2) :413–421, 2009.
- Hosang Lee and Jaeheung Park. Operational space control under actuator bandwidth limitation. In *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 12847–12852. IEEE, 2021.
- Gregory Lemasurier, Gal Bejerano, Victoria Albanese, Jenna Parrillo, Holly A Yanco, Nicholas Amerson, Rebecca Hetrick, and Elizabeth Phillips. Methods for expressing robot intent for human–robot collaboration in shared workspaces. *ACM Transactions on Human-Robot Interaction (THRI)*, 10(4) :1–27, 2021.
- Shuang Liu, Xiaoru Wanyan, and Damin Zhuang. Modeling the situation awareness by the analysis of cognitive process. *Bio-medical materials and engineering*, 24(6) :2311–2318, 2014.

- Joseph B Lyons. Being transparent about transparency : A model for human-robot interaction. In *2013 AAAI Spring Symposium Series*, 2013.
- Ali Ahmad Malik and Arne Bilberg. Complexity-based task allocation in human-robot collaborative assembly. *Industrial Robot : the international journal of robotics research and application*, 46(4) :471–480, 2019.
- Timo Malm, Juhani Viitaniemi, Jyrki Latokartano, Salla Lind, Outi Venho-Ahonen, and Jari Schabel. Safety of interactive robotics—learning from accidents. *International Journal of Social Robotics*, 2(3) :221–227, 2010.
- Nicolas Mansard, Olivier Stasse, Paul Evrard, and Abderrahmane Kheddar. A versatile generalized inverted kinematics implementation for collaborative working humanoid robots : The stack of tasks. In *2009 International conference on advanced robotics*, pages 1–6. IEEE, 2009.
- Jeremy A Marvel, Shelly Bagchi, Megan Zimmerman, and Brian Antonishek. Towards effective interface designs for collaborative hri in manufacturing : Metrics and measures. *ACM Transactions on Human-Robot Interaction (THRI)*, 9(4) :1–55, 2020.
- George Mather and Linda Murdoch. Gender discrimination in biological motion displays based on dynamic cues. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B : Biological Sciences*, 258(1353) :273–279, 1994.
- Eloise Matheson, Riccardo Minto, Emanuele GG Zampieri, Maurizio Faccio, and Giulio Rosati. Human–robot collaboration in manufacturing applications : A review. *Robotics*, 8(4) :100, 2019.
- Takafumi Matsumaru, Kazuya Iwase, Kyouhei Akiyama, Takashi Kusada, and Tomotaka Ito. Mobile robot with eyeball expression as the preliminary-announcement and display of the robot’s following motion. *Autonomous Robots*, 18 :231–246, 2005.
- Takafumi Matsumaru, Takashi Kusada, and Kazuya Iwase. Mobile robot with preliminary-announcement function of forthcoming motion using light-ray. In *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 1516–1523. IEEE, 2006.
- Alyxander David May, Christian Dondrup, and Marc Hanheide. Show me your moves ! conveying navigation intention of a mobile robot to humans. In *2015 European Conference on Mobile Robots (ECMR)*, pages 1–6. IEEE, 2015.
- John McCarthy. Making robots conscious of their mental states. In *Machine Intelligence 15*, pages 3–17, 1995.
- Angus McKerral and Kristen Pammer. Identifying objective behavioural measures of expert driver situation awareness. *Accident Analysis & Prevention*, 163 :106465, 2021.
- S Merchant, Yongjin Kwon, T Schnell, T Etherington, and T Vogl. Evaluation of synthetic vision information system (svis) displays based on pilot performance. In *20th DASC. 20th Digital Avionics Systems Conference (Cat. No. 01CH37219)*, volume 1, pages 2C1–1. IEEE, 2001.
- Ramy Meziane, Ping Li, Martin J-D Otis, Hassan Ezzaidi, and Philippe Cardou. Safer hybrid workspace using human-robot interaction while sharing production activities. In *2014 IEEE*

- International Symposium on Robotic and Sensors Environments (ROSE) Proceedings*, pages 37–42. IEEE, 2014.
- John Michael, Natalie Sebanz, and Günther Knoblich. Observing joint action : Coordination creates commitment. *Cognition*, 157 :106–113, 2016.
- George Michalos, Sotiris Makris, Panagiota Tsarouchi, Toni Guasch, Dimitris Kontovrakis, and George Chryssolouris. Design considerations for safe human-robot collaborative workplaces. *Procedia CIRP*, 37 :248–253, 2015.
- Masahiko Mikawa, Yuriko Yoshikawa, and Makoto Fujisawa. Expression of intention by rotational head movements for teleoperated mobile robot. In *2018 IEEE 15th international workshop on advanced motion control (AMC)*, pages 249–254. IEEE, 2018.
- AJung Moon, Chris AC Parker, Elizabeth A Croft, and HF Machiel Van der Loos. Did you see it hesitate?-empirically grounded design of hesitation trajectories for collaborative robots. In *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 1994–1999. IEEE, 2011.
- Kristin Moore and Leo Gugerty. Development of a novel measure of situation awareness : The case for eye movement analysis. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*, volume 54, pages 1650–1654. SAGE Publications Sage CA : Los Angeles, CA, 2010.
- Nina-Jo Moore, M Hickson, and DW Stacks. *Nonverbal communication*. New York : Oxford University Press, 2010.
- C David Mortensen. *Communication theory*. Routledge, 2017.
- Rainer Müller, Matthias Vette, and Aaron Geenen. Skill-based dynamic task allocation in human-robot-cooperation with the example of welding application. *Procedia Manufacturing*, 11 :13–21, 2017.
- Bilge Mutlu, Fumitaka Yamaoka, Takayuki Kanda, Hiroshi Ishiguro, and Norihiro Hagita. Non-verbal leakage in robots : communication of intentions through seemingly unintentional behavior. In *Proceedings of the 4th ACM/IEEE international conference on Human robot interaction*, pages 69–76, 2009.
- Bilge Mutlu, Nicholas Roy, and Selma Šabanović. Cognitive human–robot interaction. *Springer handbook of robotics*, pages 1907–1934, 2016.
- Manisha Natarajan and Matthew Gombolay. Effects of anthropomorphism and accountability on trust in human robot interaction. In *Proceedings of the 2020 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pages 33–42, 2020.
- Donald A Norman. Affordance, conventions, and design. *interactions*, 6(3) :38–43, 1999.
- Allison M Okamura. Haptic feedback in robot-assisted minimally invasive surgery. *Current opinion in urology*, 19(1) :102, 2009.
- Yusuke Okuno, Takayuki Kanda, Michita Imai, Hiroshi Ishiguro, and Norihiro Hagita. Providing route directions : design of robot’s utterance, gesture, and timing. In *Proceedings of the 4th ACM/IEEE international conference on Human robot interaction*, pages 53–60, 2009.

- Calvin KL Or, Vincent G Duffy, and Chui Chui Cheung. Perception of safe robot idle time in virtual reality and real industrial environments. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39(5) :807–812, 2009.
- Sabrina B Orique and Laurel Despins. Evaluating situation awareness : an integrative review. *Western journal of nursing research*, 40(3) :388–424, 2018.
- Elisabeth Pacherie. How does it feel to act together? *Phenomenology and the cognitive sciences*, 13 :25–46, 2014.
- Lucas Paletta, Amir Dini, Cornelia Murko, Saeed Yahyanejad, Michael Schwarz, Gerald Lodron, Stefan Ladstätter, Gerhard Paar, and Rosemarie Velik. Towards real-time probabilistic evaluation of situation awareness from human gaze in human-robot interaction. In *Proceedings of the Companion of the 2017 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pages 247–248, 2017.
- Carolyn Parkinson, Trent T Walker, Sarah Memmi, and Thalia Wheatley. Emotions are understood from biological motion across remote cultures. *Emotion*, 17(3) :459, 2017.
- Michael Peshkin and J Edward Colgate. Cobots. *Industrial Robot : An International Journal*, 26(5) :335–341, 1999.
- Henning Petruck, Sinem Kuz, Alexander Mertens, and Christopher Schlick. Increasing safety in human-robot collaboration by using anthropomorphic speed profiles of robot movements. In *Advances in Ergonomics of Manufacturing : Managing the Enterprise of the Future : Proceedings of the AHFE 2016 International Conference on Human Aspects of Advanced Manufacturing, July 27-31, 2016, Walt Disney World®, Florida, USA*, pages 135–145. Springer, 2016.
- Boleslaw Porankiewicz, Chiaki Tanaka, et al. Cutting forces by peripheral cutting of low density wood species. *BioResources*, 2(4) :671–681, 2007.
- Baptiste Prébot. *Représentation partagée et travail collaboratif en contexte C2 : monitoring d’opérateurs en situation simulée de command and control*. PhD thesis, Bordeaux, 2020.
- David Premack and Guy Woodruff. Does the chimpanzee have a theory of mind? *Behavioral and brain sciences*, 1(4) :515–526, 1978.
- Jens Rasmussen. Skills, rules, and knowledge ; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, (3) :257–266, 1983.
- Robin Read and Tony Belpaeme. Situational context directs how people affectively interpret robotic non-linguistic utterances. In *Proceedings of the 2014 ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction*, pages 41–48, 2014.
- Robin Read and Tony Belpaeme. People interpret robotic non-linguistic utterances categorically. *International Journal of Social Robotics*, 8 :31–50, 2016.
- James Reason. *Human error*. Cambridge university press, 1990.
- Nicolas Régis, Frédéric Dehais, Emmanuel Rachelson, Charles Thooris, Sergio Pizziol, Mickaël Causse, and Catherine Tessier. Formal detection of attentional tunneling in human operator–

- automation interactions. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 44(3) :326–336, 2014.
- Ronald A Rensink. Change detection. *Annual review of psychology*, 53(1) :245–277, 2002.
- Jennifer M Riley and Mica R Endsley. The hunt for situation awareness : Human-robot interaction in search and rescue. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, volume 48-3, pages 693–697. SAGE Publications Sage CA : Los Angeles, CA, 2004.
- Jennifer M Riley, Laura D Strater, Sheryl L Chappell, Erik S Connors, and Mica R Endsley. Situation awareness in human-robot interaction : Challenges and user interface requirements. In *Human-Robot Interactions in Future Military Operations*, pages 171–192. CRC Press, 2016.
- Giacomo Rizzolatti and Laila Craighero. The mirror-neuron system. *Annu. Rev. Neurosci.*, 27 : 169–192, 2004.
- Ruth Rosenholtz. Capabilities and limitations of peripheral vision. *Annual review of vision science*, 2 :437–457, 2016.
- William B Rouse and Nancy M Morris. On looking into the black box : Prospects and limits in the search for mental models. *Psychological bulletin*, 100(3) :349, 1986.
- Wilfred Rouwhorst, Ronald Verhoeven, Marieke Suijkerbuijk, Tanja Bos, Anneloes Maij, Mick Vermaat, and Roy Arents. Use of touch screen display applications for aircraft flight control. In *2017 IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, pages 1–10. IEEE, 2017.
- Sayanti Roy, Trey Smith, Brian Coltin, and Tom Williams. I need your help... or do i? maintaining situation awareness through performative autonomy. In *Proceedings of the 2023 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pages 122–131, 2023.
- Eduardo Salas, Terry L Dickinson, Sharolyn A Converse, and Scott I Tannenbaum. Toward an understanding of team performance and training. 1992.
- Eduardo Salas, Carolyn Prince, David P Baker, and Lisa Shrestha. Situation awareness in team performance : Implications for measurement and training. *Human factors*, 37(1) :123–136, 1995.
- Maha Salem, Stefan Kopp, Ipke Wachsmuth, Katharina Rohlfing, and Frank Joublin. Generation and evaluation of communicative robot gesture. *International Journal of Social Robotics*, 4 :201–217, 2012.
- Joseph Salini, Vincent Padois, and Philippe Bidaud. Synthesis of complex humanoid whole-body behavior : A focus on sequencing and tasks transitions. In *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1283–1290. IEEE, 2011.
- Paul M Salmon, Neville A Stanton, Guy H Walker, Chris Baber, Daniel P Jenkins, Richard McMaster, and Mark S Young. What really is going on? review of situation awareness models for individuals and teams. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 9(4) :297–323, 2008.

- Paul M Salmon, Neville A Stanton, Guy H Walker, Daniel Jenkins, Darshna Ladva, Laura Rafferty, and Mark Young. Measuring situation awareness in complex systems : Comparison of measures study. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39(3) :490–500, 2009.
- Jean-Marc Salotti and Ephraim Suhir. Degraded situation awareness risk assessment in the aerospace domain. In *2019 IEEE 5th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*, pages 39–43. IEEE, 2019.
- Jean-Marc Salotti, Eric Ferreri, Olivier Ly, and David Daney. Classification of Cobotic Systems. *Ingénierie cognitive*, 1(1), January 2018. URL <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01943946>.
- Eduardo Navarra Satuf, Eugenius Kaszkurewicz, Roberto Schirru, and Mario Cesar Mello Massa de Campos. Situation awareness measurement of an ecological interface designed to operator support during alarm floods. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 53 :179–192, 2016.
- Paul Saulnier, Ehud Sharlin, and Saul Greenberg. Exploring minimal nonverbal interruption in hri. In *2011 RO-MAN*, pages 79–86. IEEE, 2011.
- Guido Schillaci, Saša Bodiroža, and Verena Vanessa Hafner. Evaluating the effect of saliency detection and attention manipulation in human-robot interaction. *International Journal of Social Robotics*, 5 :139–152, 2013.
- David Schuster, Florian Jentsch, Thomas Fincannon, and Scott Ososky. The impact of type and level of automation on situation awareness and performance in human-robot interaction. In *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics. Understanding Human Cognition : 10th International Conference, EPCE 2013, Held as Part of HCI International 2013, Las Vegas, NV, USA, July 21-26, 2013, Proceedings, Part I 10*, pages 252–260. Springer, 2013.
- Markus Schwenk and Kai O Arras. R2-d2 reloaded : a flexible sound synthesis system for sonic human-robot interaction design. In *The 23rd IEEE international symposium on robot and human interactive communication*, pages 161–167. IEEE, 2014.
- Natalie Sebanz and Chris Frith. Beyond simulation? neural mechanisms for predicting the actions of others. *Nature neuroscience*, 7(1) :5–6, 2004.
- Natalie Sebanz, Harold Bekkering, and Günther Knoblich. Joint action : bodies and minds moving together. *Trends in cognitive sciences*, 10(2) :70–76, 2006.
- Claude Elwood Shannon. A mathematical theory of communication. *The Bell system technical journal*, 27(3) :379–423, 1948.
- Scott Shappell, Cristy Detwiler, Kali Holcomb, Carla Hackworth, Albert Boquet, and Douglas A Wiegmann. Human error and commercial aviation accidents : an analysis using the human factors analysis and classification system. *Human factors*, 49(2) :227–242, 2007.
- Yu Shi, Natalie Ruiz, Ronnie Taib, Eric Choi, and Fang Chen. Galvanic skin response (gsr) as an index of cognitive load. In *CHI'07 extended abstracts on Human factors in computing systems*, pages 2651–2656, 2007.
- Moondeep C Shrestha, Ayano Kobayashi, Tomoya Onishi, Hayato Yanagawa, Yuta Yokoyama, Erika Uno, Alexander Schmitz, Mitsuhiro Kamezaki, and Shigeki Sugano. Exploring the use

- of light and display indicators for communicating directional intent. In *2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pages 1651–1656. IEEE, 2016.
- Bruno Siciliano and J-JE Slotine. A general framework for managing multiple tasks in highly redundant robotic systems. In *Fifth International Conference on Advanced Robotics' Robots in Unstructured Environments*, pages 1211–1216. IEEE, 1991.
- Ari Silvola and R Andrew Russell. Robot communication via substrate vibrations. In *Proceedings of the 2005 Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA) Sydney, Australia*, pages 239–244, 2005.
- Herbert A Simon. The functional equivalence of problem solving skills. *Cognitive psychology*, 7(2) :268–288, 1975.
- Antun Skuric, Vincent Padois, and David Daney. On-line force capability evaluation based on efficient polytope vertex search. In *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 1700–1706. IEEE, 2021.
- Sichao Song and Seiji Yamada. Expressing emotions through color, sound, and vibration with an appearance-constrained social robot. In *Proceedings of the 2017 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pages 2–11, 2017.
- Sichao Song and Seiji Yamada. Effect of expressive lights on human perception and interpretation of functional robot. In *Extended abstracts of the 2018 CHI conference on human factors in computing systems*, pages 1–6, 2018.
- Matthijs TJ Spaan. Partially observable markov decision processes. In *Reinforcement learning : State-of-the-art*, pages 387–414. Springer, 2012.
- Tim Claudius Stratmann and Susanne Boll. Demon hunt-the role of endsley's demons of situation awareness in maritime accidents. In *Human-Centered and Error-Resilient Systems Development*, pages 203–212. Springer, 2016.
- Nobaru Sugimoto and Kunitomo Kawaguchi. Fault tree analysis of hazards created by robots. In *Proceedings of the 13th International Symposium on Industrial Robots and Robot*, volume 7, pages 9–13, 1983.
- Ephraim Suhir, Sami Lini, Christophe Bey, Jean-Marc Salotti, Sylvain Hourlier, and Bernard Claverie. Probabilistic modelling of the concept of anticipation in aviation. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 16(1) :69–85, 2015.
- Tina Sundelin, B Karshikoff, E Axelsson, C Olgart Höglund, Mats Lekander, and John Axelsson. Sick man walking : Perception of health status from body motion. *Brain, behavior, and immunity*, 48 :53–56, 2015.
- Daniel Szafrir, Bilge Mutlu, and Terry Fong. Communicating directionality in flying robots. In *Proceedings of the Tenth Annual ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pages 19–26, 2015.
- Yoshihiko Takahashi, Naoya Hasegawa, Katsumi Takahashi, and Takuro Hatakeyama. Human interface using pc display with head pointing device for eating assist robot and emotional

- evaluation by gsr sensor. In *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 01CH37164)*, volume 4, pages 3674–3679. IEEE, 2001.
- Paul Taylor. *Text-to-speech synthesis*. Cambridge university press, 2009.
- Richard M Taylor. Situational awareness rating technique (sart) : The development of a tool for aircrew systems design. In *Situational awareness*, pages 111–128. Routledge, 2017.
- Hamish Tennent, Dylan Moore, Malte Jung, and Wendy Ju. Good vibrations : How consequential sounds affect perception of robotic arms. In *2017 26th IEEE international symposium on robot and human interactive communication (RO-MAN)*, pages 928–935. IEEE, 2017.
- Yunus Terzioğlu, Bilge Mutlu, and Erol Şahin. Designing social cues for collaborative robots : the role of gaze and breathing in human-robot collaboration. In *Proceedings of the 2020 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pages 343–357, 2020.
- Benjamin Thompson, Bruce C Hansen, Robert F Hess, and Nikolaus F Troje. Peripheral vision : Good for biological motion, bad for signal noise segregation? *Journal of Vision*, 7(10) :12–12, 2007.
- Michael Tomasello, Malinda Carpenter, Josep Call, Tanya Behne, and Henrike Moll. Understanding and sharing intentions : The origins of cultural cognition. *Behavioral and brain sciences*, 28(5) :675–691, 2005.
- Anne Treisman. Preattentive processing in vision. *Computer vision, graphics, and image processing*, 31(2) :156–177, 1985.
- Nikolaus F Troje. The little difference : Fourier based synthesis of gender-specific biological motion. *Dynamic perception*, pages 115–120, 2002.
- Koen Van De Merwe, Henk Van Dijk, and Rolf Zon. Eye movements as an indicator of situation awareness in a flight simulator experiment. *The International Journal of Aviation Psychology*, 22(1) :78–95, 2012.
- Christian Vater, Benjamin Wolfe, and Ruth Rosenholtz. Peripheral vision in real-world tasks : A systematic review. *Psychonomic bulletin & review*, 29(5) :1531–1557, 2022.
- Mudit Verma, Siddhant Bhambri, and Subbarao Kambhampati. Theory of mind abilities of large language models in human-robot interaction : An illusion? *arXiv preprint arXiv :2401.05302*, 2024.
- Cordula Vesper, Laura Schmitz, Lou Safra, Natalie Sebanz, and Günther Knoblich. The role of shared visual information for joint action coordination. *Cognition*, 153 :118–123, 2016.
- Valeria Villani, Fabio Pini, Francesco Leali, and Cristian Secchi. Survey on human–robot collaboration in industrial settings : Safety, intuitive interfaces and applications. *Mechatronics*, 55 :248–266, 2018.
- Samantha F Warta, Olivia B Newton, Jihye Song, Andrew Best, and Stephen M Fiore. Effects of social cues on social signals in human-robot interaction during a hallway navigation task. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*, volume 62, pages 1128–1132. SAGE Publications Sage CA : Los Angeles, CA, 2018.

- Paul Watzlawick, Janet Beavin Bavelas, and Don D Jackson. *Pragmatics of human communication : A study of interactional patterns, pathologies and paradoxes*. WW Norton & Company, 2011.
- Cord Westhoff and Nikolaus F Troje. Kinematic cues for person identification from biological motion. *Perception & psychophysics*, 69(2) :241–253, 2007.
- Christopher Wickens. Attention : Theory, principles, models and applications. *International Journal of Human–Computer Interaction*, 37(5) :403–417, 2021.
- Christopher D Wickens. Attention to attention and its applications : A concluding view. *Attention : From theory to practice*, pages 239–249, 2007.
- Christopher D Wickens. Situation awareness : Review of mica endsley’s 1995 articles on situation awareness theory and measurement. *Human factors*, 50(3) :397–403, 2008.
- Xu Wu, Chuanyan Feng, Xiaoru Wanyan, Shuang Liu, Lin Ding, Chongchong Miao, Yuhui Wang, and Xueli He. How shared screen affected team collaboration task, a case study of ergonomics experiment on team situation awareness. In *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics : 15th International Conference, EPCE 2018, Held as Part of HCI International 2018, Las Vegas, NV, USA, July 15-20, 2018, Proceedings 15*, pages 241–249. Springer, 2018.
- Tsuneeo Yoshikawa. Manipulability and redundancy control of robotic mechanisms. In *Proceedings. 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 2, pages 1004–1009. IEEE, 1985.
- Yuichiro Yoshikawa, Kazuhiko Shinozawa, Hiroshi Ishiguro, Norihiro Hagita, and Takanori Miyamoto. Responsive robot gaze to interaction partner. In *Robotics : Science and systems*, pages 37–43. Citeseer, 2006.
- Daniele Zavagno, Luca Tommasi, and Bruno Laeng. The eye pupil’s response to static and dynamic illusions of luminosity and darkness. *i-Perception*, 8(4) :2041669517717754, 2017.
- Ting Zhang, Jing Yang, Nade Liang, Brandon J Pitts, Kwaku O Prakah-Asante, Reates Curry, Bradley S Duerstock, Juan P Wachs, and Denny Yu. Physiological measurements of situation awareness : a systematic review. *Human factors*, page 0018720820969071, 2020.

Annexes

Annexe A

Questionnaire SART

★ Veuillez répondre à chacune des dix questions de 1 (faible) à 7 (fort).

	1	2	3	4	5	6	7
Instabilité de la situation : Dans quelle mesure la situation est-elle changeante ? La situation est-elle très instable et susceptible de changer soudainement (fort) ou est-elle très stable et simple (faible) ?	<input type="radio"/>						
Complexité de la situation : Quel est le degré de complexité de la situation ? Est-elle complexe et comporte-t-elle de nombreux éléments interdépendants (fort) ou est-elle simple et directe (faible) ?	<input type="radio"/>						
Variabilité de la situation : Combien de variables changent dans la situation ? Y a-t-il un grand nombre de facteurs qui changent (fort) ou y a-t-il peu de variables qui changent (faible) ?	<input type="radio"/>						
Vigilance : Quel est votre degré de vigilance dans la situation ? Êtes-vous prêt pour l'activité (fort) ou avez-vous une faible vigilance (faible) ?	<input type="radio"/>						
Concentration de l'attention : Dans quelle mesure vous concentrez-vous sur la situation ? Vous concentrez-vous sur plusieurs aspects de la situation (fort) ou sur un seul (faible) ?	<input type="radio"/>						
Division de l'attention : Dans quelle mesure votre attention est-elle divisée dans la situation ? Vous concentrez-vous sur de nombreux aspects de la situation (fort) ou sur un seul (faible) ?	<input type="radio"/>						
Capacité mentale de réserve : Quelle est la capacité mentale dont vous disposez dans cette situation ? En avez-vous suffisamment pour faire face à de nombreuses variables (élevée) ou n'en avez-vous pas du tout (faible) ?	<input type="radio"/>						
Quantité d'informations : Quel est le degré d'information que vous avez acquis sur la situation ? Avez-vous reçu et compris beaucoup de connaissances (élevé) ou très peu (faible) ?	<input type="radio"/>						
Qualité de l'information : Quelle est la qualité des informations que vous avez obtenues sur la situation ? Les connaissances communiquées sont-elles très utiles (élevées) ou insuffisantes (faibles) ?	<input type="radio"/>						
Familiarité avec la situation : Dans quelle mesure connaissez-vous la situation ? Avez-vous une grande expérience en la matière (fort) ou s'agit-il d'une situation nouvelle (faible) ?	<input type="radio"/>						

Annexe B

Questionnaire NASA-TLX

• Veuillez répondre à chacune des six questions de 0 (faible) à 20 (élevée).

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Exigence Mentale : Quelle a été l'importance de l'activité mentale et intellectuelle requise (ex. réflexion, décision, calcul, mémorisation, observation, recherche etc.) ? La tâche vous a-t-elle paru simple, nécessitant peu d'attention (faible) ou complexe, nécessitant beaucoup d'attention (élevée) ?	<input type="radio"/>																				
Exigence Physique : Quelle a été l'importance de l'activité physique requise (ex. pousser, porter, tourner, marcher, activer, etc.) ? La tâche vous a-t-elle paru facile, peu fatigante, calme (faible) ou pénible, fatigante, active (élevée) ?	<input type="radio"/>																				
Exigence Temporelle : Quelle a été l'importance de la pression temporelle causée par la rapidité nécessitée pour l'accomplissement de la tâche ? Etait-ce un rythme lent et tranquille (faible) ou rapide et précipité (élevé) ?	<input type="radio"/>																				
Performance : Quelle réussite pensez-vous avoir eu dans l'accomplissement de votre tâche ? Comment pensez-vous avoir atteint les objectifs déterminés par la tâche ?	<input type="radio"/>																				
Effort : Quel degré d'effort avez-vous dû fournir pour exécuter la tâche demandée, (mentalement et physiquement) ?	<input type="radio"/>																				
Frustration : Pendant l'exécution du travail vous êtes-vous senti satisfait, relaxé, sûr de vous (niveau de frustration faible), ou plutôt découragé, irrité, stressé, sans assurance (niveau de frustration élevé) ?	<input type="radio"/>																				