HAL
open science

Étude des conditions d'acceptabilité de la collaboration homme-robot en utilisant la réalité virtuelle

Vincent Weistroffer

▶ **To cite this version:**

Vincent Weistroffer. Étude des conditions d'acceptabilité de la collaboration homme-robot en utilisant la réalité virtuelle. Robotique [cs.RO]. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2014. Français. NNT : 2014ENMP0057 . tel-01144569

HAL Id: tel-01144569

https://pastel.hal.science/tel-01144569v1

Submitted on 22 Apr 2015

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.

ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

MINES ParisTech

École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur

Doctorat ParisTech

THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris

Spécialité « Informatique temps réel, robotique et automatique »

présentée et soutenue publiquement par

Vincent WEISTROFFER

le 11 décembre 2014

Étude des Conditions d'Acceptabilité de la Collaboration Homme-Robot en utilisant la Réalité Virtuelle

Directeur de thèse : **Philippe FUCHS**
Maître de thèse : **Alexis PALJIC**

Jury

M. Pascal GUITTON, Professeur, Université de Bordeaux, INRIA	Président
M. Raja CHATILA, Directeur de recherche, ISIR, Université Pierre et Marie Curie	Rapporteur
M. Jean-Louis VERCHER, Directeur de recherche, ISM, Université Aix-Marseille II	Rapporteur
M. Claude ANDRIOT, Expert senior, CEA - LIST	Examinateur
M. Philippe FUCHS, Professeur, Centre de Robotique, MINES ParisTech	Examinateur
M. François MARSY, Responsable méthode et performance, PSA Peugeot Citroën	Examinateur
M. Alexis PALJIC, Enseignant-chercheur, Centre de Robotique, MINES ParisTech	Examinateur

T H È S E

MINES ParisTech
Centre de Robotique
60 bd Saint-Michel, 75006 Paris - France

Table des matières

Remerciements **vii**

Contexte **3**

1 Contexte **3**
1.1 La collaboration homme-robot . . . 3
1.1.1 Des robots plus sûrs et plus intelligents . . . 5
1.1.2 Des robots mieux acceptés . . . 6
1.2 La réalité virtuelle . . . 6
1.2.1 L'utilisation de la réalité virtuelle pour l'étude de l'acceptabilité . . . 7
1.2.2 La comparaison de situations virtuelles et réelles . . . 7
1.3 Organisation du manuscrit . . . 8

I Mise en place des problématiques **11**

2 La collaboration homme-robot et l'acceptabilité **13**
2.1 La collaboration homme-robot . . . 13
2.1.1 Vers une définition de la collaboration homme-robot . . . 13
2.1.1.1 La collaboration homme-homme . . . 13
2.1.1.2 La collaboration homme-ordinateur . . . 15
2.1.1.3 La collaboration homme-robot . . . 15
2.1.2 Les types de robots collaboratifs . . . 16
2.1.2.1 Les cobots . . . 17
2.1.2.2 Les manipulateurs . . . 17
2.1.2.3 Les exosquelettes . . . 19
2.1.2.4 Les robots téléopérés . . . 19
2.1.2.5 Les robots de comanipulation . . . 20
2.1.2.6 Les robots-assistants industriels . . . 21
2.1.2.7 Les robots-assistants de service . . . 23
2.1.2.8 Les robots-compagnons . . . 24
2.1.3 Les classifications de la collaboration homme-robot . . . 24
2.1.3.1 La division du travail . . . 25
2.1.3.2 La distribution spatiale . . . 26
2.1.3.3 La distribution temporelle . . . 28
2.2 L'acceptabilité de la collaboration homme-robot . . . 29
2.2.1 Vers une définition de l'acceptabilité . . . 29

2.2.2 Les composantes de l'acceptabilité de la collaboration homme-robot . . . 32
2.2.2.1 L'acceptabilité sociale . . . 32
2.2.2.2 L'acceptabilité pratique . . . 33
2.2.2.3 L'utilisabilité . . . 38
2.3 Synthèse générale . . . 43
2.3.1 La collaboration homme-robot . . . 43
2.3.2 L'acceptabilité . . . 43

3 Les méthodologies d'évaluation 45
3.1 Les tests utilisateurs . . . 45
3.1.1 Les tests en situation réelle . . . 45
3.1.2 Les tests en situation enregistrée . . . 46
3.1.3 Les tests utilisant la réalité virtuelle . . . 47
3.1.3.1 Introduction à la réalité virtuelle . . . 47
3.1.3.2 La réalité virtuelle pour l'étude de l'acceptabilité . . . 49
3.1.3.3 La pertinence de la réalité virtuelle . . . 50
3.2 L'évaluation de l'acceptabilité . . . 52
3.2.1 L'auto-évaluation . . . 52
3.2.2 Les mesures physiologiques . . . 54
3.2.2.1 Les différents types de mesures physiologiques dans l'interaction homme-robot . . . 55
3.2.2.2 L'interprétation des signaux . . . 57
3.2.3 Les mesures comportementales . . . 59
3.3 Synthèse générale . . . 60

4 Problématiques et cas d'étude 63
4.1 Problématiques . . . 63
4.1.1 Les critères d'acceptabilité de la collaboration homme-robot . . . 63
4.1.2 L'utilisation de la réalité virtuelle . . . 64
4.2 Cas d'étude . . . 65
4.2.1 Cas d'étude sur la coprésence . . . 66
4.2.2 Cas d'étude sur la collaboration . . . 67
4.3 Organisation de la deuxième partie du manuscrit . . . 69

II Expérimentations et analyses 71

5 Mise en place des cas d'étude et outils 73
5.1 Cas d'étude en environnement virtuel . . . 73
5.1.1 Environnement de simulation . . . 73
5.1.2 Contrôle de robot virtuel . . . 75
5.1.3 Intégration d'algorithmes de cinématique inverse . . . 76
5.1.4 Intégration de modèles du mouvement humain . . . 79
5.1.4.1 Les caractéristiques du mouvement humain . . . 79
5.1.4.2 La modélisation du mouvement humain . . . 80
5.1.4.3 Intégration d'heuristiques du mouvement humain pour des robots 81
5.2 Cas d'étude en environnement réel . . . 85
5.3 Evaluation de l'acceptabilité . . . 86

5.3.1 Questionnaires . . . 86
5.3.2 Mesures physiologiques . . . 87
5.4 Synthèse . . . 88

6 Etude de la coprésence homme-robot 91
6.1 Cas d'étude . . . 91
6.2 Etude de la distribution spatiale . . . 94
6.2.1 Scénario . . . 95
6.2.2 Implémentation . . . 96
6.2.2.1 Environnement réel . . . 96
6.2.2.2 Environnement virtuel . . . 97
6.2.3 Tests utilisateurs . . . 99
6.2.3.1 Population . . . 99
6.2.3.2 Protocole . . . 99
6.2.3.3 Mesures . . . 100
6.2.4 Résultats du questionnaire sur la coprésence . . . 100
6.2.4.1 Résultats globaux . . . 101
6.2.4.2 Utilisabilité . . . 102
6.2.4.3 Sécurité . . . 102
6.2.4.4 Compétence du robot . . . 103
6.2.4.5 Impression et acceptabilité . . . 104
6.2.5 Résultats du questionnaire sur les situations d'expérimentation . . . 104
6.2.5.1 Résultats globaux . . . 104
6.2.5.2 Familiarisation . . . 105
6.2.5.3 Utilité . . . 105
6.2.5.4 Sécurité . . . 106
6.2.5.5 Efficacité . . . 107
6.2.5.6 Acceptabilité . . . 107
6.2.6 Résultats des mesures physiologiques . . . 107
6.2.7 Résultats liés à la performance . . . 109
6.2.8 Synthèse des résultats . . . 110
6.3 Etude des mouvements . . . 110
6.3.1 Mise en place . . . 111
6.3.2 Tests utilisateurs . . . 113
6.3.3 Résultats du questionnaire . . . 114
6.3.3.1 Résultats globaux . . . 115
6.3.3.2 Anthropomorphisme et impression générale . . . 117
6.3.3.3 Caractère naturel . . . 117
6.3.3.4 Compétence . . . 118
6.3.3.5 Sécurité . . . 118
6.3.4 Synthèse des résultats . . . 119
6.4 Synthèse . . . 120

7 Etude de la collaboration homme-robot 121
7.1 De la coprésence vers la collaboration homme-robot . . . 121
7.2 Etude de l'apparence et des mouvements . . . 122
7.2.1 Mise en place . . . 123
7.2.1.1 Tâche de collaboration . . . 123

7.2.1.2 Apparences des robots . . . 123
7.2.1.3 Mouvements des robots . . . 124
7.2.1.4 Implémentation . . . 126
7.2.2 Tests utilisateurs . . . 127
7.2.2.1 Protocole . . . 127
7.2.2.2 Questionnaires . . . 127
7.2.2.3 Mesures physiologiques . . . 128
7.2.3 Résultats du questionnaire sur l'apparence . . . 128
7.2.3.1 Anthropomorphisme . . . 129
7.2.3.2 Compétence . . . 129
7.2.3.3 Relaxation, sécurité et impression générale . . . 129
7.2.4 Résultats du questionnaire sur les mouvements . . . 130
7.2.4.1 Anthropomorphisme . . . 131
7.2.4.2 Compétence, relaxation et sécurité . . . 132
7.2.4.3 Impression générale . . . 132
7.2.5 Résultats des mesures physiologiques . . . 132
7.2.6 Synthèse des résultats . . . 134
7.3 Etude de la distribution temporelle . . . 134
7.3.1 Cas d'étude . . . 135
7.3.1.1 Description . . . 135
7.3.1.2 Scénarios d'interaction . . . 137
7.3.1.3 Configurations de contrôle du robot . . . 137
7.3.1.4 Implémentation . . . 141
7.3.2 Tests utilisateurs . . . 143
7.3.2.1 Population . . . 143
7.3.2.2 Protocole . . . 144
7.3.2.3 Mesures . . . 144
7.3.3 Résultats du questionnaire sur les scénarios de collaboration . . . 145
7.3.3.1 Résultats globaux . . . 145
7.3.3.2 Niveau d'interaction . . . 146
7.3.3.3 Utilisabilité . . . 147
7.3.3.4 Sécurité . . . 148
7.3.3.5 Utilité . . . 149
7.3.3.6 Efficacité . . . 150
7.3.3.7 Acceptabilité . . . 151
7.3.4 Résultats du questionnaire sur les situations d'expérimentation . . . 151
7.3.4.1 Résultats globaux . . . 152
7.3.4.2 Familiarisation . . . 152
7.3.4.3 Sécurité . . . 153
7.3.4.4 Acceptabilité . . . 154
7.3.5 Résultats des mesures physiologiques . . . 154
7.3.6 Synthèse des résultats . . . 156
7.4 Synthèse . . . 157

Synthèse **161**

8 Synthèse et discussions **161**
8.1 Les critères d'acceptabilité . . . 161
8.1.1 Les composantes et les facteurs de l'acceptabilité . . . 162
8.1.1.1 Les composantes de l'acceptabilité . . . 162
8.1.1.2 Les facteurs de l'acceptabilité . . . 162
8.1.2 Les apports de notre étude . . . 163
8.1.2.1 Facteurs liés au robot . . . 163
8.1.2.2 Facteurs liés à la configuration de collaboration . . . 165
8.1.3 Synthèse . . . 166
8.2 La validation de notre méthodologie . . . 167
8.2.1 L'utilisation des questionnaires . . . 168
8.2.1.1 Apport des questionnaires . . . 168
8.2.1.2 Limites et perspectives . . . 168
8.2.2 L'utilisation des mesures physiologiques . . . 169
8.2.2.1 Apport des mesures physiologiques . . . 169
8.2.2.2 Limites et perspectives . . . 169
8.2.3 L'utilisation de la réalité virtuelle . . . 170
8.2.3.1 Biais relatifs aux opérations . . . 170
8.2.3.2 Biais relatifs au sentiment de présence . . . 171
8.2.4 Synthèse . . . 172
8.3 Discussions, limites et perspectives . . . 174
8.3.1 Limites de notre étude . . . 174
8.3.2 Discussion sur les facteurs d'acceptabilité . . . 175
8.3.3 Utilisation de notre méthodologie en milieu industriel . . . 176
8.3.4 Perspectives sur la robotique de service . . . 177
8.3.5 Considération finale . . . 178

Contributions scientifiques **179**

Bibliographie **181**

Annexes **195**

A Le contrôle de bras manipulateurs **195**
A.1 La modélisation et la cinématique robotique . . . 195
A.2 La cinématique directe . . . 196
A.3 La cinématique inverse . . . 197

B Etude sur la distribution spatiale **201**

C Etude sur les mouvements **205**

D Etude sur l'apparence et les mouvements **209**

E Etude sur la distribution temporelle **213**

Remerciements

Ce manuscrit de thèse, bien que rédigé par le doctorant lui-même, présente des travaux de recherche qu'il n'aurait pas été possible de mettre en place sans l'implication d'un grand nombre de personnes que je souhaite remercier.

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse, Philippe Fuchs, et mon maître de thèse, Alexis Paljic, pour m'avoir accordé leur confiance et fourni leurs conseils pendant ces trois années. Philippe et Alexis ont su m'orienter dans les bonnes directions tout en me laissant la liberté de développer mes propres problématiques de recherche. Cette liberté d'action et de réflexion, même si elle était perturbante en début de thèse, m'a permis de m'imprègner de thèmes de recherche et de problématiques qui me sont propres. Je suis aujourd'hui très reconnaissant à mes encadrants de m'avoir accordé cette liberté. Philippe et Alexis ont également toujours été ouverts à la discussion, notamment sur des questions de fond, et j'ai fortement appris de leur expérience et de leur esprit critique. Je suis désormais très fier d'avoir travaillé à leurs côtés et très satisfait d'avoir développé des centres d'intérêt pluridisciplinaires que je continuerai d'approfondir à l'avenir. J'espère que Philippe et Alexis auront autant apprécié que moi ces trois années de travail de recherche.

Ce travail de thèse n'aurait pas été possible sans le soutien de la chaire « PSA Peugeot Citroën - Robotique et Réalité Virtuelle » et des personnes qui y participent. Je tiens tout d'abord à remercier l'ensemble des personnes du projet NOVA (Nouvelles Voies d'Automatisation) de PSA Peugeot Citroën, pour leur accueil et leur implication dans la chaire. Nahid Armand, chef du projet NOVA, a été d'une grande aide dans la valorisation de nos travaux en milieu industriel. Elle a toujours su garder un équilibre entre l'aspect académique et l'aspect industriel de nos recherches, avec une bonne compréhension des problématiques qui nous étaient chères. Nahid a également pu nous mettre en relation avec les personnes adéquates de son équipe pour la mise en place d'expérimentations en environnement réel. Je tiens spécialement à remercier Pascal Ligot, qui a été notre contact privilégié dans le cadre de la chaire pendant environ deux ans. Pascal a été un élément moteur dans la chaire et a permis d'obtenir une vision claire des travaux que nous voulions mener. Je suis persuadé que l'intérêt scientifique de ma thèse aurait été bien plus réduit sans l'implication active de Pascal. Je souhaite également remercier l'ensemble des personnes du projet NOVA qui ont participé, de près ou de loin, aux travaux de la chaire, notamment Antoine Lasnier, Denis Delbosc, Bruno Elie et Xavier Pinguet. Je tiens spécialement à remercier Romain Roussel, stagiaire en robotique dans le cadre de la chaire, Thibaut Planes, pour son aide précieuse dans l'implémentation de notre dernière expérimentation, et Laurent Durville, qui a été un élément-clé dans le contact avec le site de Trémery. Enfin, je tiens à remercier Alain Sonet pour son accompagnement dans nos travaux dans les derniers mois de ma thèse.

La chaire a également fait intervenir le Centre de Réalité Virtuelle de PSA Peugeot Citroën. J'aimerais remercier Stéphane Masfrand, chef du CRV, qui a pu apporter son point de vue sur nos expérimentations en environnement virtuel et qui a bien voulu mettre à notre disposition

les systèmes de réalité virtuelle de son centre. Je souhaite également remercier Michel Rebeyrol pour sa disponibilité et son aide lors de la mise en place des cas d'étude en environnement virtuel et pour la planification des tests utilisateurs.

Toujours au sein de la chaire, je tiens à remercier fortement Alexandre Morais, responsable de l'ergonomie industrielle de PSA Peugeot Citroën, pour ses conseils et son implication dans la mise en place de nos expérimentations. J'ai toujours apprécié nos discussions avec Alexandre, qui m'ont permis d'obtenir une vue d'ensemble des problématiques importantes de l'ergonomie sur les chaînes de montage, notamment grâce à plusieurs visites d'usines de PSA Peugeot Citroën. Alexandre a été un élément moteur dans la mise en place de nos cas d'étude et dans le discours à établir avec les opérateurs d'usine. Alexandre a également encadré Jean-Paul Chodacki, stagiaire ergonome dans le cadre de la chaire, que je souhaite remercier pour son implication importante dans la mise en place de nos premières expérimentations. Enfin, je tiens à remercier les opérateurs d'usine qui ont accepté de participer à nos expérimentations, à chaque fois pour une journée complète et avec des conditions de transport parfois difficiles (déplacements depuis les sites de Poissy et de Trémery).

En dehors de PSA Peugeot Citroën, la chaire a fait intervenir des personnes de l'école des Mines. Je tiens essentiellement à remercier Olivier Hugues et Eva Coupeté pour leur aide précieuse sur les différentes expérimentations menées et pour leur accompagnement dans les (parfois nombreux) voyages à Vélizy. J'espère avoir mis en place avec eux une base de recherche solide et des perspectives intéressantes, et je leur souhaite bonne continuation dans la suite des travaux liés à la chaire. Je tiens aussi à remercier Lucile Callebert, stagiaire à l'école des Mines dans le cadre de la chaire, pour son aide sur l'utilisation de notre système de mesures physiologiques et je lui souhaite bon courage pour son doctorat en cours.

Au cours de ma thèse, j'ai été en contact avec de nombreuses personnes et entreprises extérieures. J'ai notamment beaucoup échangé avec l'entrepise SpirOps sur des problématiques d'animation et de mouvements anthropomorphes. Je tiens à remercier Thibaut Gaudin, Ahmad Abdul Karim et Axel Buendia pour leur accueil, leur curiosité et leur intérêt à nos problématiques. J'espère qu'ils auront apprécié nos discussions et que de futures collaborations pourront éventuellement se créer. Je tiens également à remercier Christine Mégard, ergonome au CEA, pour son point de vue sur nos premières expérimentations et pour m'avoir fait parvenir des articles importants sur l'ergonomie et l'acceptabilité des systèmes technologiques.

L'ensemble de ma thèse n'aurait pas été mené de la même façon sans le support et l'ambiance chaleureuse de mon laboratoire d'accueil, le Centre de Robotique CAOR de l'école des Mines. J'ai passé en tout six années dans cette école (trois années en tant qu'élève-ingénieur, trois années en tant que doctorant) et je crois pouvoir affirmer que ces trois dernières années ont été celles que j'ai le plus appréciées. Mon expérience au sein du CAOR a été formidable, notamment au niveau professionnel avec mon projet de thèse, mais surtout au niveau humain, au cours de mes discussions avec les personnes du laboratoire, mon implication au sein de l'association des doctorants, les multiples voyages au ski et les soirées au Pantalon. J'ai noué des relations fortes au sein d'un très bon cercle d'amis que je remercie ici : Sylvain (avec les pauses bananes), Eva, Etienne, Jean-François, Raoul, Tom, Raphaëlle, Axel, Bruno, Cyril, Amaury, Fernando... J'espère que l'ambiance au sein du CAOR sera toujours aussi chaleureuse après mon départ et que j'y serai encore le bienvenu !

Pour terminer, je tiens à remercier mes parents et ma sœur pour leur soutien dans les derniers moments difficiles, pour leur hébergement lorsque j'avais besoin de repos et pour l'envoi de différentes coupures de journaux et de magazines relatives à mon sujet de thèse, me réconfortant sur le fait que mes recherches étaient bien d'actualité et n'étaient pas si difficiles à vulgariser !

Contexte

Chapitre 1

Contexte

Dans le domaine industriel ou au quotidien, l'interaction entre des humains et des robots devient de plus en plus commune. Cette interaction est pour le moment encore minime, mais des hommes et des robots seront bientôt amenés à travailler ensemble de manière rapprochée. Dans le milieu industriel, la complémentarité de leurs compétences est souvent mise en avant et on parle de collaboration homme-robot.

Le développement de la collaboration homme-robot a fait naître des sujets de recherche intéressants. D'une part, pour que des humains puissent travailler à proximité des robots sans danger, il est nécessaire de constamment améliorer la sécurité et l'intelligence des robots. D'autre part, il est également primordial de déterminer dans quel cadre l'introduction de ces robots est accepté par les humains dans leur environnement. Ces deux problématiques constituent les axes de recherche de la chaire « PSA Peugeot Citroën - Robotique et Réalité Virtuelle » [1], établie entre MINES ParisTech, PSA Peugeot Citroën et la Fondation MINES ParisTech.

Ce manuscrit présente les résultats d'une thèse entreprise dans le cadre de la chaire. Les thèmes principaux de cette thèse sont la collaboration homme-robot et l'acceptabilité d'une part et la réalité virtuelle d'autre part. La thèse se focalise en effet sur la détermination des conditions de l'acceptabilité de la collaboration homme-robot et propose d'utiliser la réalité virtuelle dans cette étude. Les cas d'étude de la thèse sont tirés de postes d'usine de PSA Peugeot Citroën.

1.1 La collaboration homme-robot

La première apparition concrète de robots utiles pour l'homme s'est effectuée dans le domaine industriel afin d'automatiser des tâches pénibles, dangereuses et répétitives, soulageant ainsi les efforts des opérateurs et leur permettant de travailler sur des tâches plus valorisantes. Ces premiers robots étaient imposants et dangereux : afin de garantir la sécurité des opérateurs, ces robots étaient entourés de barrières qu'il était impossible de franchir. Ce type de robots existe toujours en usine, sur des postes où l'intervention humaine est peu sollicitée.

Cependant, il existe des tâches qui requièrent à la fois les compétences d'un robot (force, précision, répétabilité) et celles d'un opérateur (intelligence, adaptabilité, prise de décision). Il devient alors nécessaire que certains robots autorisent une présence humaine dans leur espace de travail, afin que robots et opérateurs puissent bénéficier des compétences de chacun. Ainsi, les besoins changeant et les technologies évoluant, les barrières entourant les robots laissent place à d'autres systèmes de sécurité qui permettent aux opérateurs d'interagir et de collaborer avec eux,

1. http://chaire-rrv.fr/

tels de véritables partenaires de travail. Plutôt que d'avoir des postes entièrement robotisés d'un côté et des postes entièrement manuels de l'autre, de nouveaux postes hybrides sont aujourd'hui à l'étude pour mettre à profit la complémentarité des compétences entre opérateurs et robots : on parle de collaboration homme-robot (voir Figure 1.1).

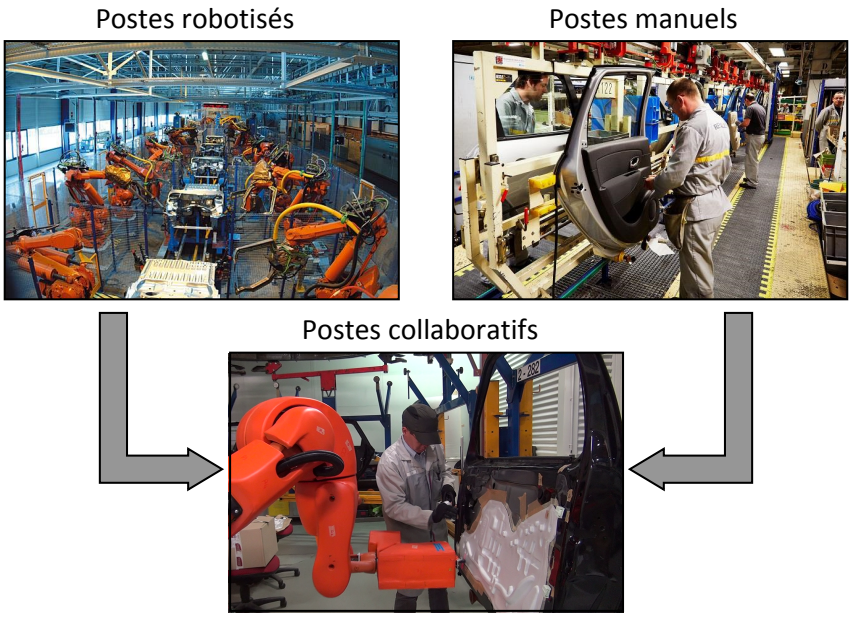


FIGURE 1.1 – Objectifs de la collaboration homme-robot dans le domaine industriel

Parallèlement à leur évolution dans le milieu industriel, les robots ont également commencé à apparaître dans notre environnement quotidien. D'abord utilisés en tant que jouets par les enfants, les robots parviennent désormais à se démocratiser en tant qu'appareils domestiques, tels que les robots-aspirateurs autonomes. A l'avenir, d'autres robots, encore peu connus du public, seront utilisés pour assister physiquement les personnes dépendantes à leur domicile, accompagner psychologiquement les enfants dans les hôpitaux ou permettre de communiquer à distance avec des personnes de sa famille (voir Figure 1.2).

FIGURE 1.2 – L'introduction de robots dans l'environnement quotidien

Que ce soit dans le milieu industriel ou notre environnement quotidien, les évolutions actuelles suggèrent que nous serons amenés de plus en plus à partager notre espace avec des robots, à communiquer et à interagir avec eux. Du côté des robots, cette considération implique qu'ils

devront pouvoir évoluer dans leur environnement et s'y adapter, sans faire de mal aux personnes avec qui ils devront interagir. Du côté des personnes, il s'agit de savoir comment cette arrivée des robots dans leur environnement sera perçue et acceptée. Ces deux problématiques constituent les deux axes de recherche principaux de la chaire « PSA Peugeot Citroën - Robotique et Réalité Virtuelle », qui se place dans le contexte général de la robotique industrielle, avec des cas d'étude tirés des chaînes de montage de l'industrie automobile.

1.1.1 Des robots plus sûrs et plus intelligents

Lorsqu'il s'agit de faire cohabiter et collaborer un opérateur et un robot, la première problématique qui se pose est celle de la sécurité. Le danger a dans un premier temps été écarté à l'aide de barrières physiques, empêchant les opérateurs d'entrer dans la zone de travail des robots, mais empêchant également toute collaboration. Des systèmes à base de lasers (barrières immatérielles, lasers au sol) et à base de caméras (optiques, infrarouges) sont alors apparus pour remplacer ces barrières physiques et superviser la zone de travail (voir Figure 1.3). Ces systèmes permettent de délimiter des zones de sécurité autour du robot et autorisent certains opérateurs à y pénétrer. La présence d'opérateurs dans ces zones impose également des contraintes sur le comportement du robot (vitesse et force réduites). Plutôt que d'avoir une sécurité déportée à l'extérieur du robot, d'autres dispositifs ont été conçus pour rendre les robots intrinsèquement sécurisés. Grâce à une structure mécanique spécifique et des capteurs intégrés (capteurs de force, capteurs tactiles ou capacitifs), ces nouveaux robots peuvent détecter la proximité d'opérateurs et d'éventuelles collisions et ralentir ou s'arrêter en conséquence.

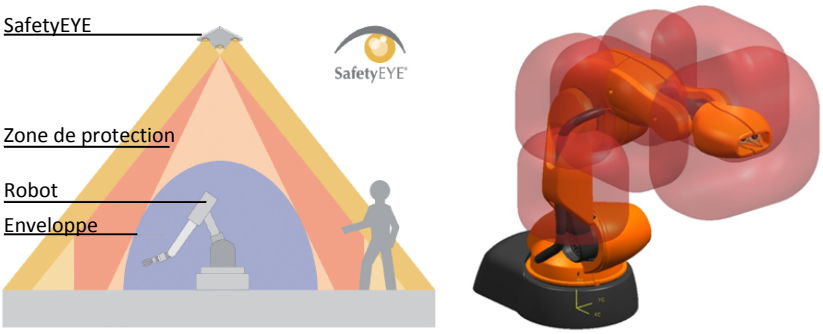


FIGURE 1.3 – Le système de supervision SafetyEYE à base de caméras et le robot Kuka KR5SI dotés de ses capteurs détectant une proximité humaine

De nos jours, les robots deviennent donc de plus en plus sûrs : il est possible de s'en approcher sans risque d'accident. Mais leur degré de compréhension de l'environnement et des gestes des opérateurs reste encore limité. Une étape supplémentaire consisterait à rendre les robots plus intelligents et plus conscients de leur environnement afin de mieux adapter leur comportement à différentes situations. Par exemple, en reconnaissant les gestes des opérateurs, les robots pourraient anticiper certaines des opérations à effectuer ou au contraire ralentir la cadence lorsque les opérateurs prennent du retard. Les robots pourraient également détecter des événements imprévus, tels que l'arrivée d'une personne inconnue ou un accident. Ces thèmes de recherche constituent un axe entier de la chaire « PSA Peugeot Citroën - Robotique et Réalité Virtuelle », avec notamment une thèse sur la reconnaissance des gestes des opérateurs.

1.1.2 Des robots mieux acceptés

Alors que la problématique de la sécurité de la collaboration homme-robot est de plus en plus étudiée à l'heure actuelle, celle de l'acceptabilité de cette collaboration par les opérateurs l'est encore peu dans le domaine industriel. Cette problématique est pourtant primordiale : même si la collaboration entre un opérateur et un robot est avantageuse par rapport à deux postes distincts et que la sécurité des opérateurs est garantie, la mise en place de cette collaboration sera perturbée si les opérateurs n'acceptent pas de travailler avec des robots. Cette problématique regroupe des notions variées, d'aspect éthique et social (remplaçabilité des opérateurs par des robots) mais aussi d'aspect pratique, liées à l'utilisabilité (utilité perçue, facilité d'utilisation, satisfaction).

Les facteurs pouvant influencer l'acceptabilité de travailler avec des robots sont nombreux. Ils peuvent être liés au robot : apparence (voir Figure 1.4), mouvements, comportement, intelligence perçue. Ils peuvent aussi être liés à la configuration du poste de travail : partage de l'espace entre l'opérateur et le robot, répartition des tâches. Il est important de déterminer les critères pertinents de cette acceptabilité, notamment dans le domaine industriel, afin de pouvoir concevoir des robots et des configurations de collaboration qui soient mieux acceptés par les opérateurs. Ce thème de recherche constitue un deuxième axe entier de la chaire « PSA Peugeot Citroën - Robotique et Réalité Virtuelle », dont les résultats de thèse exposés dans ce manuscrit font partie.

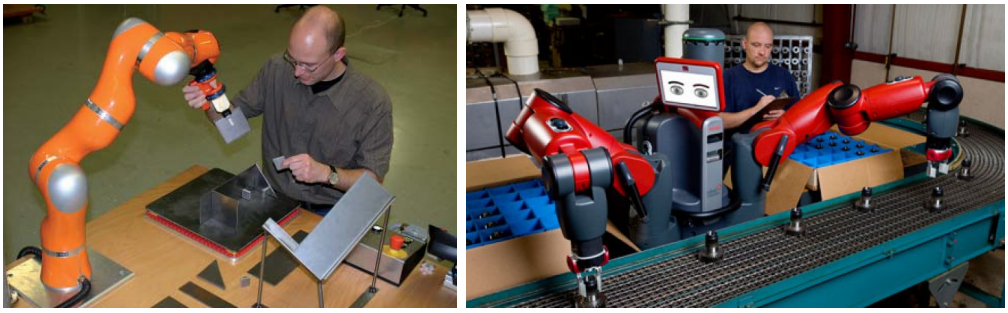


FIGURE 1.4 – Des robots d'apparences différentes peuvent influencer l'acceptabilité des opérateurs à travailler avec eux (à gauche : Kuka LWR ; à droite : Baxter)

Afin d'étudier les conditions d'acceptabilité de la collaboration homme-robot, il est nécessaire de procéder à des tests avec des opérateurs pour recueillir leurs impressions sur différentes configurations. Ces tests peuvent s'effectuer en environnement réel : les opérateurs sont placés en situation réelle avec un robot industriel et sont amenés à collaborer sur des tâches communes. Ces tests laissent cependant peu de liberté dans les paramètres à évaluer : les configurations sont souvent imposées et il est difficile de modifier facilement et rapidement plusieurs paramètres pertinents de l'étude d'acceptabilité. C'est pourquoi, dans nos recherches, il est envisagé d'utiliser la réalité virtuelle pour mener des tests en environnements virtuels dans lesquels les opérateurs sont confrontés à des situations de collaboration avec des robots virtuels.

1.2 La réalité virtuelle

La réalité virtuelle permet à une personne (ou à plusieurs) d'être immergée dans un environnement virtuel et d'y interagir de manière pseudo-naturelle. L'immersion et l'interaction

de cet utilisateur dans l'environnement virtuel se font au moyen de diverses interfaces sensori-motrices : systèmes d'écrans pour le retour visuel, systèmes de capture de mouvements pour l'interaction. L'utilisateur a ainsi l'impression d'évoluer à échelle réelle dans l'environnement qui lui est proposé.

La réalité virtuelle est utilisée dans de nombreux domaines, allant de l'aéronautique au nucléaire, en passant par la thérapie et le divertissement (voir Figure 1.5). La réalité virtuelle peut être utilisée à des buts de formation, comme c'est le cas des pilotes d'avion ou des moniteurs de centrale nucléaire. Elle peut aussi être utilisée à des buts de conception, notamment en industrie automobile afin de prototyper et tester des produits sous forme numérique avant leur production réelle. La réalité virtuelle peut également être utilisée à des buts thérapeutiques, pour le traitement des phobies (peur du vide, des araignées...) ou la réhabilitation médicale. Dans la majorité des domaines d'application, c'est l'humain qui est placé au centre des études.

FIGURE 1.5 – Un simulateur de conduite (MINES ParisTech) et un environnement de formation à la technique de projection d'enduit de façade de bâtiment (Clarté)

1.2.1 L'utilisation de la réalité virtuelle pour l'étude de l'acceptabilité

Dans notre étude sur l'acceptabilité de la collaboration homme-robot, nous proposons d'utiliser la réalité virtuelle pour présenter aux opérateurs des configurations de collaboration diverses et facilement modifiables. Ces configurations permettent aux opérateurs d'évoluer dans un environnement virtuel et d'interagir avec des robots virtuels.

Par exemple, la réalité virtuelle représente un atout si l'on veut comparer des robots d'apparences différentes. Plutôt que de disposer de plusieurs robots physiques (encombrants et coûteux), on peut les simuler virtuellement et procéder à des tests en environnements virtuels (voir Figure 1.6), dans lesquels il est possible d'effectuer facilement des modifications subtiles de l'apparence ou des mouvements des robots. Au-delà des critères liés aux robots, on peut également modifier les scénarios d'interaction et tester des configurations nouvelles, sans avoir à reprogrammer entièrement les robots et sans représenter de danger pour les opérateurs.

1.2.2 La comparaison de situations virtuelles et réelles

Même si les avancées technologiques actuelles permettent une meilleure immersion et une meilleure interaction des utilisateurs en environnement virtuel, l'utilisation de la réalité virtuelle possède encore des limites et des biais liés à des problèmes de latence et d'incohérences sensori-motrices [Fuchs *et al.*, 2006b, p. 9]. Le comportement des utilisateurs en environnement virtuel

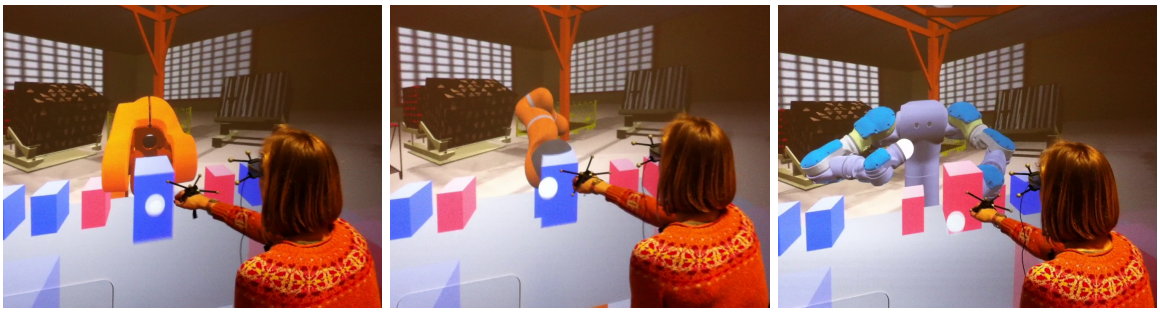


FIGURE 1.6 – Le même environnement de simulation avec trois robots d'apparences différentes

peut en effet différer de la situation réelle, notamment par manque de retour haptique (impossibilité de toucher physiquement les objets virtuels) ou à cause de la simplification de certaines actions (utilisation de métaphores différentes de la vie courante).

Ces considérations sont à prendre en compte lorsque l'on procède à des tests utilisateurs en environnement virtuel. Notamment dans l'étude de l'acceptabilité de la collaboration homme-robot, il s'agit de recueillir des impressions subjectives d'opérateurs vis-à-vis de robots (sentiment de peur, de stress, de satisfaction) et d'étudier le comportement de ces opérateurs face à différentes configurations de collaboration. Il est donc primordial de déterminer si les résultats issus de tests en situation virtuelle sont fiables et représentatifs de la situation réelle.

Pour y parvenir, il est nécessaire de mener des tests identiques en situations virtuelle et réelle (voir Figure 1.7). La comparaison des résultats dans ces deux situations permet alors de déterminer dans quel cadre les impressions et les comportements des opérateurs sont similaires en environnements virtuel et réel, si les résultats issus des tests virtuels rendent bien compte de la situation réelle et si la réalité virtuelle peut être utilisée comme un outil pour l'évaluation de l'acceptabilité de la collaboration homme-robot.

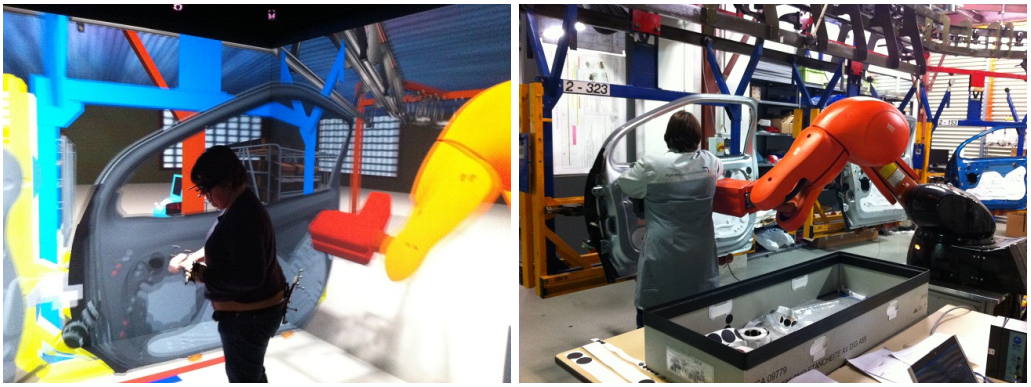


FIGURE 1.7 – Comparaison du comportement d'un opérateur en situation virtuelle (à gauche) et en situation réelle (à droite)

1.3 Organisation du manuscrit

La thèse se concentre autour de deux thèmes principaux : la collaboration homme-robot et la réalité virtuelle. D'une part, la thèse s'intéresse à déterminer quels sont les critères importants

qui rentrent en jeu dans l'acceptabilité de la collaboration homme-robot, essentiellement en environnement industriel et du point de vue des opérateurs. D'autre part, la thèse propose d'utiliser la réalité virtuelle pour mener des tests d'évaluation de cette acceptabilité et de déterminer si la réalité virtuelle est un outil pertinent dans cette évaluation.

Le manuscrit est divisé en deux parties principales.

La première partie se concentre sur l'état de l'art de notre domaine de recherche et sur la mise en place de nos problématiques. Le Chapitre 2 définit les termes de collaboration homme-robot et d'acceptabilité tout en présentant un état de l'art sur les avancées technologiques actuelles de cette collaboration et sur les facteurs qui peuvent influencer son acceptabilité. Le Chapitre 3 se focalise sur les méthodologies qui ont été utilisées dans la littérature pour évaluer l'interaction homme-robot et notamment l'acceptabilité : tests utilisateurs, questionnaires, mesures physiologiques. Enfin, le Chapitre 4 explicite nos problématiques de recherche au regard des états de l'art précédemment exposés et présente les cas d'étude envisagés pour y répondre.

La deuxième partie du manuscrit tente de répondre aux problématiques avec la mise en place de cas d'étude et d'expérimentations. Le Chapitre 5 expose dans un premier temps les outils qui ont été utilisés pour mettre en place nos cas d'étude : environnement de simulation, contrôle de robot virtuel, utilisation de questionnaires et de mesures physiologiques. Le Chapitre 6 présente un premier cas d'étude sur la coprésence homme-robot ainsi que deux expérimentations associées, sur la distribution spatiale et les mouvements des robots. Le Chapitre 7 présente quant à lui deux cas d'étude sur la collaboration homme-robot et deux expérimentations associées, sur l'apparence des robots et leurs mouvements et sur la distribution temporelle des tâches. Enfin, le Chapitre 8 établit une synthèse globale des résultats des cas d'étude en répondant aux problématiques et propose une discussion sur plusieurs points importants.

Première partie

Mise en place des problématiques

Chapitre 2

La collaboration homme-robot et l'acceptabilité

Ce chapitre a pour objectif de présenter un état de l'art sur les avancées actuelles liées à la collaboration homme-robot et sur les critères d'acceptabilité de cette collaboration. Nous tentons de définir les termes importants de ces thèmes de recherche au regard de la littérature et d'exemples connus à ce jour. Une synthèse générale est proposée à l'issue de cet état de l'art afin de mieux positionner nos recherches et de déterminer quels en sont les enjeux importants.

2.1 La collaboration homme-robot

Dans cette section, nous proposons un état de l'art sur la collaboration homme-robot. Tout d'abord, la notion de collaboration homme-robot est explicitée en se basant sur les définitions de la collaboration de manière générale puis celle de la collaboration homme-ordinateur. Ensuite, nous décrivons l'ensemble des robots collaboratifs existant à ce jour et leurs domaines d'application. Puis, nous classifions les situations de collaboration homme-robot selon la division du travail et la distribution spatio-temporelle des acteurs.

2.1.1 Vers une définition de la collaboration homme-robot

Dans un premier temps, nous nous basons sur les définitions de la collaboration homme-homme et de la collaboration homme-ordinateur pour déterminer dans quel cadre elles peuvent s'appliquer et éclaircir la notion de collaboration homme-robot.

2.1.1.1 La collaboration homme-homme

La notion de collaboration n'est pas facile à définir de façon générale et diffère selon le domaine à partir duquel on l'étudie. Chellali [Chellali, 2009] a donné un aperçu des différentes définitions possibles, dans les domaines du dialogue homme-machine, de l'intelligence artificielle, de la psychologie cognitive et enfin du travail collaboratif assisté par ordinateur. Chellali a ensuite proposé sa propre définition appliquée à son domaine d'étude : les environnements virtuels collaboratifs.

Globalement, chacune de ces définitions propose des points de vue différents sur les notions de tâche commune et de but commun. Une représentation intéressante, et reprise dans plusieurs définitions, est celle de Rogalski [Rogalski, 1994], qui fait la distinction entre la coaction, la

coopération et la collaboration. La **coaction** n'engage ni but commun, ni tâche commune entre les participants : ceux-ci effectuent essentiellement des tâches en parallèle (on peut aussi parler de coprésence). La **coopération** implique d'atteindre un but commun en assignant à chaque participant des tâches différentes (et donc des sous-objectifs). La **collaboration**, quant à elle, atteint ce but commun grâce à une tâche commune entre les participants.

Ainsi, la coopération et la collaboration partagent toutes les deux le concept de but commun mais l'atteignent par deux moyens différents : des tâches dissociées (sous-objectifs) ou une tâche commune. Généralement, le fait de travailler ensemble dans un but commun apporte un gain par rapport au travail en solitaire [Adorno, 2011].

Au quotidien comme dans certaines études et domaines scientifiques, les termes de coopération et de collaboration sont cependant souvent considérés comme synonymes. Dans la suite de ce manuscrit, pour éviter de prêter à confusion, nous utiliserons le terme de collaboration comme englobant les deux précédemment définis (coopération et collaboration). Ainsi, le terme de collaboration sera utilisé pour désigner le processus de travailler ensemble (via des tâches dissociées ou non) dans l'objectif d'un but commun.

Afin d'obtenir une bonne collaboration entre agents, plusieurs prérequis sont nécessaires et peuvent être résumés ainsi [Terveen, 1994] :

- Accord sur les buts à atteindre ;
- Planification, allocation et coordination des tâches à accomplir entre les agents ;
- Définition d'un référentiel commun (suivi de l'évolution du système) ;
- Communication ;
- Adaptation et apprentissage (les agents doivent s'adapter à leurs partenaires et apprendre d'eux).

Alors que les deux premiers éléments (détermination des buts et coordination des tâches) sont des étapes préalables à l'activité de collaboration, les trois derniers (référentiel commun, communication et adaptation) sont des éléments facilitateurs de la collaboration.

La définiton d'un référentiel commun permet à tous les agents de partager une représentation commune de la situation et de disposer des mêmes informations, compréhensibles par tous. La notion de référentiel commun a été beaucoup mentionnée par Hoc [Hoc, 2001]. Pour Hoc, la collaboration est considérée comme la gestion d'interférences : chaque agent, pour atteindre son propre objectif, interfère avec celui des autres et gère ces interférences de manière à faciliter les activités individuelles ou l'activité collective. Cette gestion des interférences s'effectue à trois niveaux : la coopération dans l'action, la coopération dans la planification et la méta-coopération. Alors que la coopération dans l'action gère les interférences des activités entre agents à court terme, la coopération dans la planification permet aux agents de garder une vision claire de leur coordination et des buts à atteindre. Enfin, la méta-coopération met l'accent sur l'élaboration d'un code de communication commun, de représentations compatibles et de modèles de chacun. C'est la gestion des interférences à ces trois niveaux qui permet le maintien d'un référentiel commun.

Sans communication, la collaboration devient moins effective. La communication peut intervenir sous modalité verbale ou non-verbale [Green *et al.*, 2007; Bauer *et al.*, 2008], grâce à la gestuelle, au regard, aux expressions faciales ou au toucher.

Enfin, pour bien collaborer, il est nécessaire de pouvoir s'adapter aux autres agents. Pour y parvenir, chaque agent possède une représentation de soi et des autres agents sous forme de modèles, comprenant par exemple leur niveau d'expertise, leurs connaissances ou leurs préférences [Terveen, 1994; Fong *et al.*, 2002].

2.1.1.2 La collaboration homme-ordinateur

Le concept de collaboration entre des humains et des éléments technologiques est probablement d'abord apparu en ergonomie cognitive. Dans son ensemble, l'ergonomie est la discipline qui traite de la compréhension des interactions entre l'humain et les éléments d'un système, afin d'améliorer le bien-être de l'utilisateur. On y distingue trois domaines : l'ergonomie physique, cognitive et organisationnelle. L'ergonomie cognitive est plus centrée sur les processus mentaux (perception, mémoire...) et traite notamment du sujet des interactions homme-ordinateur. C'est dans ce domaine qu'est apparu le concept de collaboration homme-ordinateur (*Human-Computer Collaboration*, HCC).

Avec l'apparition de ce concept, plusieurs chercheurs se sont réunis pour débattre de sa nature, de ses caractéristiques et de ses modélisations. Terveen [Terveen, 1994] a donné un aperçu complet de ces considérations, ainsi qu'une définition générale de la collaboration : la collaboration est un processus dans lequel deux ou plusieurs agents travaillent ensemble pour atteindre des buts partagés.

Terveen a indiqué que la HCC était inspirée par deux domaines principaux : l'intelligence artificielle et l'interaction homme-ordinateur. Ces deux disciplines ont fait naître deux approches différentes dans la manière de traiter la HCC : l'approche émulative (*human emulation*) et l'approche complémentaire (*human complementary*). Alors que la première approche vise plutôt à doter la machine de capacités semblables à celles de l'homme pour l'amener à collaborer, la seconde mise sur les aspects asymétriques des deux types d'agent et la division des rôles.

Les modèles de collaboration issus de l'ergonomie cognitive ont été appliqués à divers domaines, tels que les systèmes à base de données [Terveen, 1994], le contrôle de trafic aérien [Hoc, 2001] ou plus récemment l'assistance à la conduite automobile [Navarro, 2009].

2.1.1.3 La collaboration homme-robot

La norme ISO 8373 donne la définition suivante d'un robot [IFR, 2011] :

> Un robot est un mécanisme actionné programmable selon deux axes ou plus avec un degré d'autonomie, se déplaçant dans son environnement, pour effectuer des tâches.

Ainsi, même si les robots partagent certaines caractéristiques avec les ordinateurs (intelligence artificielle, communication), ils s'en distinguent par le fait qu'ils sont physiquement présents et qu'ils peuvent évoluer dans l'espace des utilisateurs. La collaboration avec des humains ne se fait plus seulement au niveau de la communication (comme c'en était le sens sous-entendu pour des ordinateurs), mais de nouvelles opportunités apparaissent : les robots peuvent se déplacer (en roulant ou en marchant), communiquer visuellement avec les utilisateurs (gestes, expressions), interagir avec des objets physiques de l'environnement ou toucher des personnes. Cette notion de présence physique amène également de nouvelles considérations, comme celle de la sécurité des utilisateurs.

La collaboration homme-robot est avant tout un sous-domaine de l'interaction homme-robot (*Human-Robot Interaction*, HRI). Fong *et al.* ont fourni un aperçu complet de la HRI [Fong *et al.*, 2003] et en ont donné une définition : c'est « l'étude des humains, des robots et des manières dont ils s'influencent les uns les autres » [Fong *et al.*, 2002]. Cela comprend l'analyse, le design, la modélisation, l'implémentation et l'évaluation de robots pour un usage destiné aux humains. Bauer *et al.* [Bauer *et al.*, 2008] ont bien fait la distinction entre la HRI, qui étudie l'influence de l'action des robots *sur* quelqu'un, et la HRC, qui étudie l'influence de l'action des robots effectuée *avec* quelqu'un dans un but commun.

Dans le domaine de l'interaction homme-robot, les tâches requiérant une opération ou un travail commun entre une personne et un robot sont souvent reliées au concept d'intention jointe ou d'action jointe. L'action jointe est une interaction sociale par laquelle plusieurs individus coordonnent leurs actions dans l'espace et le temps afin d'apporter un changement dans l'environnement [Vesper, 2014]. Le CNRS-LAAS [1] de Toulouse s'est largement intéressé à intégrer ces notions d'engagement et d'intention jointe dans l'interaction homme-robot. Clodic *et al.* [Clodic *et al.*, 2005] ont notamment développé une architecture décisionnelle pour des robots autonomes interagissant avec des humains et ont appliqué cette approche à un robot-guide. Pour que la collaboration homme-robot (ou l'action jointe entre l'humain et le robot) soit effective, il est nécessaire que le robot soit doté de fonctions spécifiques lui permettant d'estimer l'intention des utilisateurs, de planifier ses actions et d'agir en conséquence [Laengle *et al.*, 1997; Bauer *et al.*, 2008]. Il lui faut aussi savoir communiquer et s'adapter aux personnes, par exemple en formant des modèles stéréotypés de chaque utilisateur [Fong *et al.*, 2003].

Les robots partagent certaines caractéristiques avec les ordinateurs (intelligence artificielle, communication) et en possèdent des supplémentaires (actions physiques), mais ils montrent également des lacunes quand on les compare au niveau d'intelligence et d'autonomie des humains. Les robots sont toujours incapables d'effectuer certaines opérations, nécessitant du discernement, de la flexibilité ou une prise de décision. A l'inverse, les humains peuvent difficilement effectuer des opérations spécialement conçues pour des robots, impliquant la répétabilité, le port de charge lourde ou la précision. Ainsi, les compétences des hommes et des robots sont bien différentes et la répartition des rôles entre les deux est généralement asymétrique lors de tâches de collaboration. Etant donnée cette asymétrie, l'approche émulative de la collaboration, mise en avant par Terveen [Terveen, 1994] et visant à doter les machines de capacités semblables à celles des hommes, ne peut pas encore s'appliquer dans le domaine de la collaboration homme-robot. C'est plutôt l'approche complémentaire (tout du moins à l'heure actuelle) qui prédomine et qui vise à mettre à profit la complémentarité des compétences des hommes et des robots.

Laengle *et al.* [Laengle *et al.*, 1997] ont bien discerné cette complémentarité des compétences entre homme et robot dans leur définition d'une « équipe homme-robot » (*human-robot team*), dans laquelle le robot soulage l'opérateur de tâches répétitives pour que celui-ci puisse se concentrer sur des parties plus valorisantes. Bauer *et al.* [Bauer *et al.*, 2008] parlent également de compétences complémentaires au service d'un but commun.

La Figure 2.1 propose un récapitulatif des domaines adjacents à la collaboration homme-robot.

2.1.2 Les types de robots collaboratifs

La robotique est généralement divisée en deux domaines distincts : la robotique industrielle et la robotique de service. Alors que la première s'adonne à des applications industrielles, la deuxième s'applique plutôt auprès des personnes au quotidien. La norme ISO 8373 donne ses propres définitions des types de robots correspondants [IFR, 2011] :

- Robot manipulateur industriel : un manipulateur contrôlé automatiquement, reprogrammable, à buts multiples, programmable selon trois axes ou plus, qui peut être soit fixe soit mobile, pour des applications d'automatisation industrielle ;
- Robot de service : un robot qui effectue des tâches utiles pour les humains, à l'exception des applications d'automatisation industrielle.

1. Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes

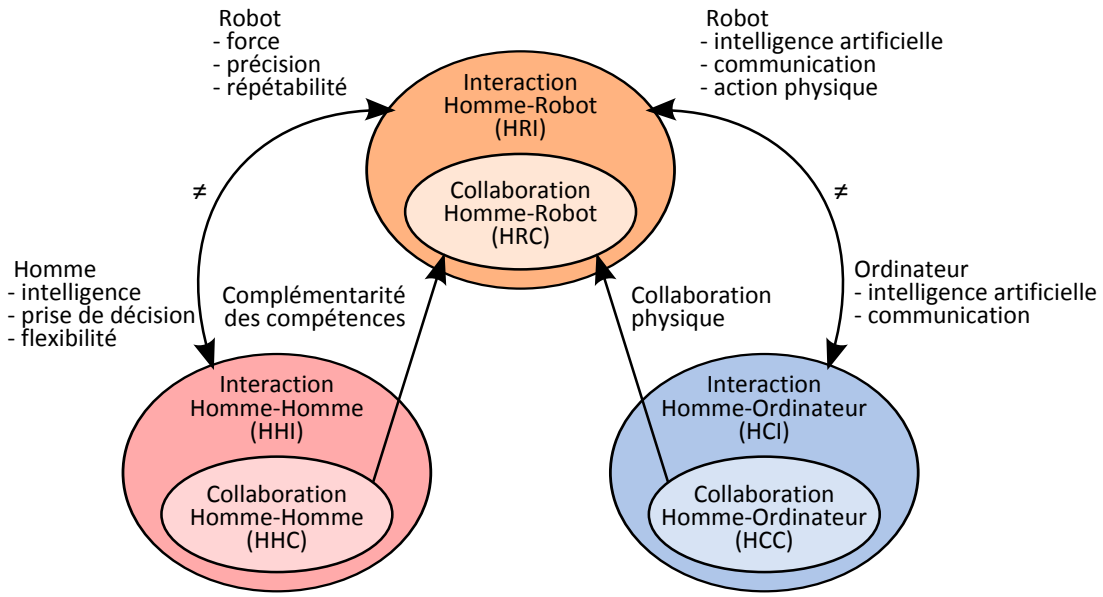


FIGURE 2.1 – Schéma des domaines adjacents à la collaboration homme-robot

Dans la suite, nous présentons les différents robots (industriels ou de service) existant à l'heure actuelle qui peuvent être rattachés (de près ou de loin) au domaine de la collaboration homme-robot.

2.1.2.1 Les cobots

La première utilisation de robots dit collaboratifs a probablement été celle des *cobots* (pour *collaborative robot* en anglais), introduits par Colgate *et al.* dans les années 1990 [Colgate *et al.*, 1996]. Il s'agit d'outils robotisés destinés à assister les opérateurs dans des tâches de manipulation et de déplacement d'objet : le cobot contraint les mouvements de l'opérateur dans des zones et chemins prédéfinis et programmables, à l'aide de surfaces virtuelles. Cette tâche de guidage de mouvements est entièrement passive (c'est l'opérateur qui fournit la puissance) et fait des cobots une technologie intrinsèquement sécurisée pour la collaboration homme-robot. Les premiers prototypes de cobots ont été implémentés par Colgate *et al.* : ce sont des bases mobiles à 1, 2 ou 3 roues manipulables à l'aide d'une poignée mais dont les mouvements sont contraints dans l'espace (voir Figure 2.2). Le concept des cobots a également intéressé des industriels du domaine automobile, tels que General Motors avec la création d'un prototype de cobot pour le montage/démontage de portes de voiture [Wannasuphoprasit *et al.*, 1998].

2.1.2.2 Les manipulateurs

Les cobots se sont progressivement vus doter de fonctions d'assistance à la charge, avec l'apparition des manipulateurs, connus sous le nom d'*Intelligent Assist Devices* (IAD) en anglais. Ils consacrent plus d'importance au contrôle des mouvements du robot : amplification de force, compensation d'inertie, compensation de friction. Akella *et al.* [Akella *et al.*, 1999] ont proposé une taxonomie de ces technologies : les IADs partagent les atouts des assistants traditionnels (spécifiques à la tâche) et des robots (contrôle) et peuvent être classifiés selon qu'ils fournissent une assistance en puissance et/ou une assistance en guidage (voir Figure 2.3). L'intérêt des

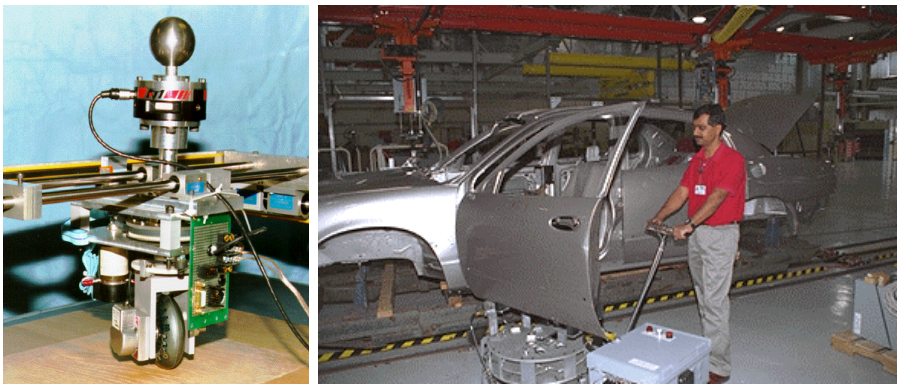


FIGURE 2.2 – Le premier cobot Unicycle à une roue et un cobot pour le montage de portes chez General Motors [Wannasuphoprasit *et al.*, 1998]

IADs est largement reconnu dans le milieu industriel, notamment sur les chaînes de montage (automobile ou autre), pour des raisons principalement ergonomiques, mais aussi liées à la sécurité et à la flexibilité. Un état de l'art des ces technologies a été proposé par Colgate *et al.* [Colgate *et al.*, 2003], avec diverses applications industrielles telles que le montage d'un cockpit de voiture. Le *Skill-Assist*, proposé par Yamada *et al.* [Yamada *et al.*, 1999], fait notamment partie de ces technologies : il s'agit d'un robot manipulateur avec contrôle à impédance variable pour le positionnement d'objets.

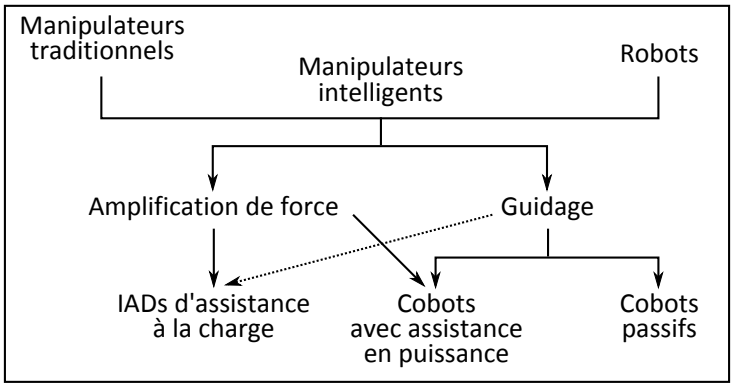


FIGURE 2.3 – Classification des cobots et des IADs selon Akella *et al.* [Akella *et al.*, 1999]

Plus récemment, le projet européen *PiSA* (financé par le FP6) [Krüger *et al.*, 2010] a repris le concept des IADs avec le terme équivalent de *Intelligent Assist Systems* pour la coopération homme-robot sur les lignes d'assemblage. Krüger *et al.* [Krüger *et al.*, 2006] ont proposé un nouveau prototype de ce genre de technologie, nommé *Intelligent Power Assist Device* : l'accent est mis sur la bonne combinaison à utiliser entre le guidage de mouvements (intrinsèquement passif et sécurisé) et une assistance en puissance limitée (pour garantir des critères de sécurité). Surdilovic *et al.* [Surdilovic *et al.*, 2010] et Koskinen *et al.* [Koskinen *et al.*, 2009] ont insisté sur la stabilité et la sécurité de tels systèmes et ont présenté leur approche pour la pose de vitre automobile (voir Figure 2.4).

L'entreprise française RB3D est spécialisée dans la conception et la fabrication de cobots d'assistance à la charge et à la manipulation d'outils, avec leur famille de systèmes de 1 à 7 axes

motorisés.

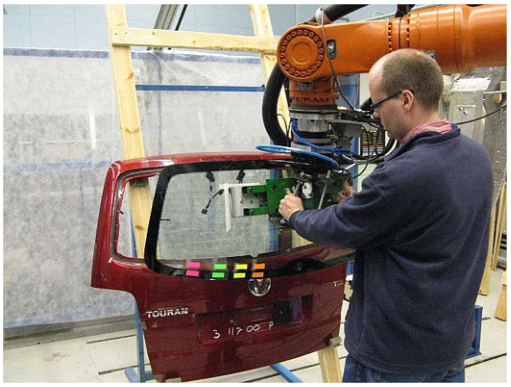


FIGURE 2.4 – Un IAD pour la pose de vitres pour le projet *PiSA* [Koskinen *et al.*, 2009]

2.1.2.3 Les exosquelettes

Les exosquelettes sont souvent considérés comme des cobots, dans la mesure où ce sont des squelettes externes que les opérateurs portent sur eux et qui les assistent dans leurs mouvements. Dans les domaines de l'armée et de l'industrie, l'enjeu est d'amplifier les mouvements des opérateurs pour les aider à porter des charges lourdes. Les buts sont à la fois de gagner en efficacité, mais également en ergonomie en soulageant les contraintes biomécaniques des opérateurs. L'exosquelette Hercule, développé pour la DGA [2] en coopération avec l'entreprise RB3D, le CEA-LIST [3] et l'ESME Sudria [4], permet de porter des charges allant jusqu'à 100kg (voir Figure 2.5).

Pour les personnes handicapées ou atteintes de troubles moteurs, les exosquelettes peuvent apporter une aide dans les activités de réhabilitation. Un grand nombre d'exosquelettes ont ainsi été développés dans des buts thérapeutiques. L'un des premiers est probablement l'exosquelette HAL (*Hybrid Assembly Limb*), développé par Cyberdyne (voir Figure 2.5) : les signaux nerveux et musculaires du patient sont mesurés grâce à des capteurs sur la peau et les mouvements de l'exosquelette sont contrôlés en conséquence [Sankai, 2006]. L'exosquelette EMY (*Enhancing MobilitY*) est développé par le CEA-LIST et dispose de quatre membres pour redonner de la mobilité aux patients tétraplégiques : il comporte notamment deux bras anthropomorphes ABLE également développés par le CEA.

2.1.2.4 Les robots téléopérés

Très tôt, les robots ont également été utilisés dans des buts de téléopération, que ce soit dans les domaines du nucléaire, de l'aérospatial (avec le Robonaut [Glassmire *et al.*, 2004], voir Figure 2.6) ou de l'armée. L'avantage des robots est qu'ils peuvent atteindre des zones dangereuses pour l'homme et résister à des conditions extrêmes. Dans ces configurations, les robots sont sur le terrain pour récolter des informations, mais ils n'ont pas toujours le degré d'interprétation nécessaire pour prendre une décision : l'humain reste présent pour superviser les opérations et donner des directives si besoin. C'est dans ce cadre que Fong [Fong, 2001] a utilisé

2. Direction Générale de l'Armement
3. Commissariat à l'Energie Atomique - Laboratoire d'Intégration des Systèmes et Technologies
4. Ecole Spéciale de Mécanique et d'Electricité

FIGURE 2.5 – Les exosquelettes Hercule (RB3D, CEA, ESME), HAL [Sankai, 2006] et EMY (CEA)

le terme de contrôle collaboratif (*collaborative control*) pour la téléopération : pour compenser leur manque d'autonomie, les robots doivent parfois demander des conseils à l'opérateur.

Les robots téléopérés peuvent également augmenter les compétences de l'opérateur. Par exemple, en chirurgie peu invasive, les robots chirurgicaux confèrent aux chirurgiens une dextérité, une visibilité, une précision et une liberté de mouvement plus satisfaisantes. Les chirurgiens manipulent des instruments chirurgicaux robotisés de manière minutieuse (filtrage et réduction des tremblements) et visualisent les opérations en 3D sur un écran déporté. Le robot DaVinci (voir Figure 2.6) est de nos jours utilisé dans plusieurs hôpitaux pour des téléopérations de chirurgie peu invasive.

FIGURE 2.6 – Le Robonaut pour l'exploration spatiale [Glassmire *et al.*, 2004] et le robot DaVinci pour la chirurgie téléopérée

2.1.2.5 Les robots de comanipulation

A l'inverse des cobots, des IADs et des exosquelettes, pour lesquels la collaboration s'effectue à travers le robot comme outil, la collaboration peut aussi se faire de manière symétrique : l'homme et le robot portent chacun une partie de l'objet à déplacer et la communication se fait au niveau haptique (à travers l'objet). Kosuge *et al.* [Kosuge *et al.*, 2000] ont présenté le prototype MRHelper (*Mobile Robot Helper*) sur ce principe (voir Figure 2.7) : le robot et l'utilisateur interagissent uniquement via l'objet manipulé (une table) et le contrôle du robot

est basé sur la détection de la force intentionnelle de l'humain. Le concept initial a été étendu à la coopération avec plusieurs robots, par Hirata et Kosuge [Hirata et Kosuge, 2000], avec le prototype DRHelper (*Distributed Robot Helper*). Plus récemment, Wojtara *et al.* [Wojtara *et al.*, 2009] et Mörtl *et al.* [Mörtl *et al.*, 2012] ont proposé leurs propres algorithmes pour le positionnement précis d'un objet dans l'espace en collaboration avec un robot.

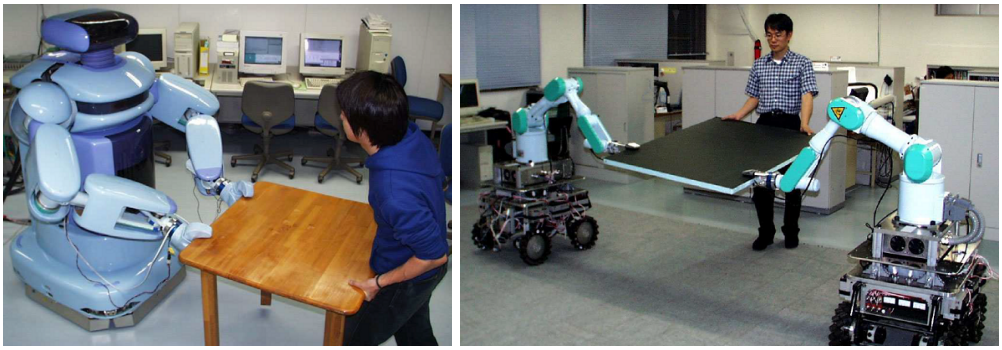


FIGURE 2.7 – Les robots MRHelper [Kosuge *et al.*, 2000] et DRHelper [Hirata et Kosuge, 2000] pour la comanipulation d'objets

2.1.2.6 Les robots-assistants industriels

De nouveaux concepts de robots collaboratifs voient actuellement le jour, avec des degrés d'autonomie, de flexibilité et d'interaction plus aboutis. Ces robots sont destinés à assister les opérateurs dans des tâches d'assemblage et de manipulation, tels de véritables partenaires de travail.

Helms *et al.* [Helms *et al.*, 2002] ont proposé une définition du *robot-assistant* comme un système flexible autorisant l'interaction directe avec l'opérateur et offrant une assistance basée à la fois sur l'action, la perception et le traitement des informations. Le schéma de la Figure 2.8 montre bien que certains types de robots (comme les cobots et les IADs) possèdent des atouts limités à une ou deux dimensions (perception, traitement des données, action), alors que les robots-assistants doivent apporter une contribution sur les trois à la fois. Cette définition a amené au développement du prototype rob@work : il s'agit d'un robot mobile muni d'un bras articulé pour la manipulation d'objets (voir Figure 2.9). Deux scénarios de collaboration homme-robot ont été étudiés avec ce prototype : l'assemblage de pompes hydrauliques (le robot amène les pièces à l'opérateur) et une opération de soudure manuelle (l'opérateur guide le robot tandis que celui-ci préserve une vitesse constante et un angle adéquat).

A la même époque, un autre type de robot-assistant a été développé : il s'agit du robot CoRA (*Cooperative Robot Assistant*) [Iossifidis *et al.*, 2002], un bras articulé d'apparence anthropomorphe. Initialement conçu pour des tâches d'assemblage industriel, ses fonctionnalités variées (détection de l'opérateur, reconnaissance vocale et gestuelle, flexibilité) font qu'il peut également être utilisé pour des applications liées à la robotique de service.

Le concept de robot-assistant de Helms a été repris par Schraft *et al.* [Schraft *et al.*, 2005] avec le système *PowerMate*. Ce prototype, qui met l'accent sur le respect des normes de sécurité en environnement industriel, assiste l'opérateur dans des tâches d'assemblage en lui apportant les pièces nécessaires. Il peut également travailler de façon autonome pour permettre à l'opérateur d'intervenir sur d'autres postes en parallèle. C'est également le même principe qui a été utilisé

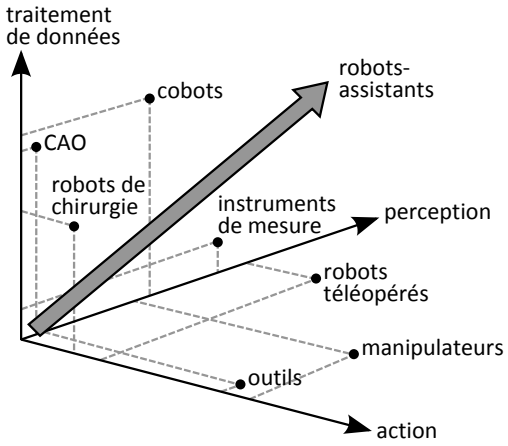


FIGURE 2.8 – La définition du robot-assistant selon Helms *et al.* [Helms *et al.*, 2002] : contribution à la fois en perception, traitement de données et action

par Tan *et al.* [Tan *et al.*, 2009] pour la mise en place d'une cellule de production collaborative avec un opérateur et deux robots.

Le robot Kuka LWR (*Lightweight Robot*), conjointement développé avec le centre aérospatial allemand (*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*), a été utilisé dans de nombreux projets en tant que robot-assistant. Notamment, le projet européen *SMErobot*, qui s'est intéressé au concept de collaboration homme-robot dans les petites et moyennes entreprises, l'a utilisé dans des tâches d'assemblage avec programmation par démonstration (voir Figure 2.9). Dans le cadre du projet européen *Phriends*, l'aspect sécuritaire du robot a été étudié et un concept de robot-assistant a été proposé [Haddadin *et al.*, 2009], pour des applications d'assemblage et de dévracage de pièces (*bin-picking*).

Le projet *JAST* (*Joint-Action Science and Technology*) [Rickert *et al.*, 2007] dispose d'une plateforme dans laquelle l'opérateur et le robot sont de part et d'autre d'un plan de travail et coopèrent pour construire divers types d'objets à l'aide de pièces en bois (voir Figure 2.9). Le robot dispose de fonctionnalités de reconnaissance et de synthèse vocale, ainsi que d'un système de vision pour suivre l'évolution du système. L'intérêt de ce projet est la capacité du robot à superviser les opérations : c'est lui qui indique les actions à effectuer à l'opérateur et qui l'assiste en lui tendant certaines pièces. Des cas d'étude similaires ont été proposés par le projet *JAHIR* (*Joint-Action for Humans and Industrial Robots*) [Lenz, 2011] pour l'assemblage de pièces industrielles en collaboration avec des robots.

Récemment, le robot Baxter de Rethink Robotics a été présenté pour des cas d'application industriels [Fitzgerald, 2013]. Il est doté de nombreux capteurs de vision et lasers ainsi que d'une interface simple d'utilisation. Le *dual-arm concept robot* (anciennement robot Frida), développé par ABB dans le cadre du projet *Rosetta* [Kock *et al.*, 2011], et le robot NextAge de Kawada Industries sont également développés pour travailler sans danger aux côtés d'opérateurs sur les chaînes d'assemblage (voir Figure 2.10). A l'heure actuelle, ces types de robots sont présentés comme des « robots collaboratifs », mais ils sont surtout utilisés pour l'automatisation de tâches minutieuses, sans réelle interaction avec les opérateurs. Il n'y donc pas de collaboration homme-robot à proprement parler.

Les robots-assistants du domaine industriel tendent actuellement à se développer également en tant que robots mobiles, à l'instar de la plateforme proposée par le projet *LOCOBOT* (*Low*

FIGURE 2.9 – Les robots-assistants rob@work [Helms *et al.*, 2002] et Kuka LWR [Haddadin *et al.*, 2009] et la plateforme *JAST* [Rickert *et al.*, 2007]

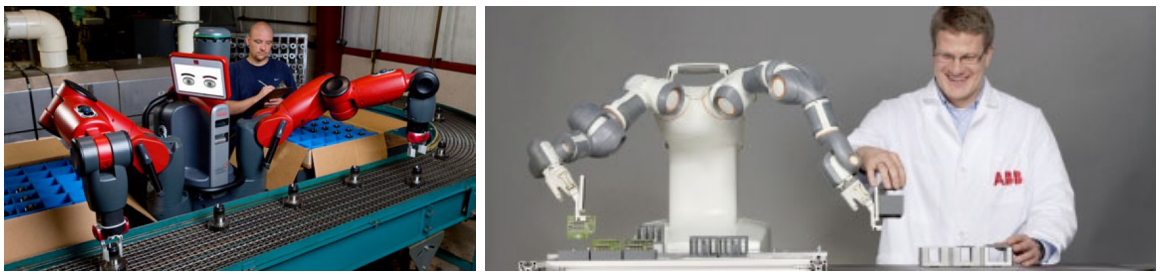


FIGURE 2.10 – Les robots-assistants Baxter [Fitzgerald, 2013] et Frida [Kock *et al.*, 2011] pour les tâches minutieuses

Cost Robot Co-Workers) [Barattini *et al.*, 2013] pour l'industrie automobile électrique. Ce projet se concentre sur des tâches complexes nécessitant une grande flexibilité et une forte adaptabilité des systèmes robotisés : les cas d'étude envisagés sont le déplacement de caisses de pièces ou encore le montage de batterie automobile en collaboration avec des opérateurs. La plateforme est notamment dotée de fonctionnalités de reconnaissance vocale et de reconnaissance gestuelle afin de faciliter la collaboration.

2.1.2.7 Les robots-assistants de service

Le premier concept de robot d'assistance pour les personnes âgées ou handicapées a probablement été celui proposé par Schraft *et al.* avec le robot Care-O-bot [Schraft *et al.*, 1998]. L'intérêt de ce type de robot est de permettre aux personnes en difficulté, généralement assistées par des médecins et des infirmières, de vivre de manière autonome à leur domicile. Dans un contexte où la population est de plus en plus vieillissante, l'enjeu est également de pouvoir réduire les coûts médicaux liés à l'assistance des personnes âgées. Le concept initial du robot Care-O-bot a été amélioré constamment et en est à la troisième version [Parlitz *et al.*, 2008] : le robot peut désormais se localiser et se déplacer dans l'environnement, manipuler des objets grâce à un bras articulé et interagir avec les patients (voir Figure 2.11).

De manière similaire, le projet *GiraffPlus* [Coradeschi *et al.*, 2013] vise à assister les personnes âgées à leur domicile en plaçant un réseau de capteurs dans leurs maisons afin de récolter des données sur leur état physique et en y faisant évoluer le robot semi-autonome Giraff (contrôlé par téléprésence) pour garder un contact social avec ces personnes (voir Figure 2.11). Le projet

Assist, quant à lui, entrepris par le LIRMM [5], le CEA-LIST [6], le CNRS-LAAS [7] et l'ISIR [8], cherche à developper un robot pour l'assistance à domicile des personnes tétraplégiques. Il s'agit d'un robot mobile doté de fonctionnalités de manipulation à deux bras.

FIGURE 2.11 – Le robot Care-O-bot [Parlitz *et al.*, 2008] et le robot Giraff [Coradeschi *et al.*, 2013] pour l'assistance des personnes âgées à domicile

Les robots mobiles sont aussi utilisés pour des applications de visite interactive de salons ou de musées. Les robots Rhino [Burgard *et al.*, 1999] et Minerva [Thrun *et al.*, 1999], par exemple, ont été conçus pour communiquer avec les gens et les guider dans des musées. Leurs capteurs de proximité et leurs caméras leur permettent de se déplacer sans danger au milieu des gens, alors que des fonctionnalités vocales leur permettent de communiquer avec eux.

2.1.2.8 Les robots-compagnons

L'assistance aux personnes, à défaut d'être opérationnelle pour des tâches physiques de la vie quotidienne, peut également s'établir au niveau relationnel : on parle alors de *robot-compagnon*. On s'écarte cependant du domaine de la collaboration dans le cadre où la notion de but commun n'est pas présente ici. Le robot-chien Aibo développé par Sony [Friedman *et al.*, 2003] a été l'un des premiers robots-jouets permettant d'interagir de façon autonome avec les gens. Paro est un robot thérapeutique en forme de bébé-phoque, développé par la société japonaise AIST, destiné à être utilisé dans les hôpitaux et les maisons de retraite [Shibata *et al.*, 2009] : à l'aide de capteurs sensibles au toucher, à la lumière et au son, il réagit à la présence et au comportement du patient de manière à le réconforter et le relaxer. Dans un même ordre d'idée, le projet européen *Aliz-e* s'intéresse à l'interaction des enfants avec les robots et utilise notamment le robot humanoïde Nao de la société Aldebaran (voir Figure 2.12) pour accompagner les enfants diabétiques dans les hôpitaux [Nalin *et al.*, 2012].

2.1.3 Les classifications de la collaboration homme-robot

A partir de la littérature existante sur la collaboration de manière générale, Chellali [Chellali, 2009] a proposé de classifier les situations collaboratives selon trois attributs :

- La division du travail ;
- La distribution spatiale et temporelle des acteurs ;

5. Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier
6. Commissariat à l'Energie Atomique - Laboratoire d'Intégration des Systèmes et Technologies
7. Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes
8. Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique

FIGURE 2.12 – Le robot-chien Aibo [Friedman *et al.*, 2003], le robot-phoque Paro [Shibata *et al.*, 2009] et le robot humanoïde Nao [Nalin *et al.*, 2012].

– Le nombre de participants.

Concernant le nombre de participants, Chellali distingue les situations de collaboration au sein d'un petit groupe (deux à quatre participants, à court terme) et d'un grand groupe (milliers de participants, comme les réseaux sociaux). Dans le cas de la collaboration homme-robot, le nombre de participants est toujours réduit à un petit groupe, typiquement un utilisateur et un robot.

Dans la suite, la division du travail et la distribution spatio-temporelle des acteurs sont explicitées dans le contexte de la collaboration homme-robot.

2.1.3.1 La division du travail

La division du travail concerne la répartition des rôles entre les participants : elle peut être soit collective, soit distribuée [Chellali, 2009]. La division du travail prend une forme collective lorsque les rôles des participants sont symétriques et interchangeables. A l'inverse, la division du travail prend une forme distribuée lorsque les rôles des acteurs sont bien définis et indépendants.

Dans le cadre de la collaboration homme-robot, les rôles des hommes et des robots ne sont jamais vraiment symétriques, à cause de la complémentarité de leurs compétences. Ainsi, les tâches requiérant un jugement ou une prise de décision sont attribuées à l'homme, tandis que les tâches répétitives et fatigantes sont attribuées au robot. Par exemple, pour le port de charge lourde, même si le robot et l'homme travaillent ensemble sur la même tâche (porter la charge), c'est généralement l'homme qui guide et impose la trajectoire tandis que le robot supporte le poids. C'est le cas des cobots, des IADs et des exosquelettes, où la relation entre l'homme et le robot est plutôt celle de maître-esclave.

De nos jours, certains robots gagnent de plus en plus en autonomie mais ont toujours besoin de la supervision de l'homme pour des tâches complexes de prise de décision : c'est le cas par exemple des robots téléopérés qui peuvent agir seuls sur le terrain. Pour compenser leur manque d'autonomie, leur rôle peut évoluer au cours de la collaboration : c'est le principe de l'autonomie ajustable mis en avant par Sheridan et Verplank en 1978 pour la téléopération de robots sous-marins [Sheridan et Verplank, 1978]. Elle est basée sur les modes d'autonomie du robot : le robot peut être contrôlé totalement par l'opérateur ou agir à l'inverse de façon complètement autonome, ou alors fonctionner selon des modes intermédiaires où il agit en fonction du consentement ou du refus de l'opérateur. L'intérêt de cette classification consiste a pouvoir choisir dynamiquement le mode d'autonomie adéquat en fonction de l'activité à effectuer, du contexte actuel et de l'état de l'opérateur. Ce principe a été repris, discuté et amélioré dans de nombreux systèmes et études [Dorais *et al.*, 1999; Parasuraman *et al.*, 2000; Crandall et Goodrich, 2001].

Le terme de contrôle collaboratif a également été initié par Fong [Fong, 2001] et repris par Zieba *et al.* [Zieba *et al.*, 2009] pour désigner les situations où le manque d'autonomie du robot peut être compensé par les conseils d'un opérateur.

Dans certaines situations, il est parfois nécessaire de laisser une part de responsabilité et de contrôle à l'utilisateur, afin que celui-ci se sente toujours utile et ait moins d'appréhension vis-à-vis de l'interaction avec le robot. Par exemple, de nos jours, certains véhicules automatisés sont désormais capables d'effectuer des créneaux de manière autonome, mais c'est toujours le conducteur qui ordonne au véhicule de continuer (ou non) sa manœuvre. Toujours dans le cas de la conduite automobile partagée, même s'il devient de nos jours possible d'avoir des véhicules complètement automatisés, une question primordiale reste de savoir si les personnes accepteront facilement de se laisser conduire par ce genre de véhicules en leur laissant un contrôle total.

L'autonomie des systèmes robotisés s'améliore également dans le domaine industriel, avec l'arrivée des robots-assistants. L'autonomie des robots devient telle qu'ils peuvent être considérés comme de véritables partenaires de travail. On attribue toujours aux robots des tâches relevant de leurs compétences, mais la répartition des rôles se fait de manière plus symétrique entre l'opérateur et le robot et la division du travail tend à devenir plus collective.

2.1.3.2 La distribution spatiale

La distribution spatiale des participants dépend de la localisation de chacun d'eux : la collaboration peut se faire de manière co-localisée si les agents sont dans un même lieu, ou alors de manière distribuée s'ils travaillent à distance [Chellali, 2009].

Pour la collaboration homme-robot, les situations évidentes où les activités sont distribuées spatialement sont celles liées à la téléopération : les opérateurs contrôlent ou communiquent à distance avec un robot agissant sur le terrain. La distribution temporelle des autres situations de collaboration est moins facile à discerner et dépend généralement du niveau de sécurité.

Historiquement, les espaces des robots et des humains ont obligatoirement été séparés : il était impossible de pénétrer dans la zone de travail des robots, délimitée par des barrières physiques (infranchissables) ou immatérielles (barrières de laser provoquant un arrêt du robot lorsqu'elles sont franchies). Les robots et les opérateurs interagissaient alors à distance. Petit-à-petit, ces barrières ont disparu, permettant aux opérateurs de s'approcher des robots sans pour autant entrer dans leur zone active de travail : les opérateurs pouvaient se placer dans des zones spécifiques de l'espace du robot tandis que celui-ci travaillait activement dans une autre partie distincte (co-localisation partielle). Puis les espaces des robots et des humains ont été amenés à fusionner en un espace commun jusqu'à autoriser le contact physique (co-localisation totale).

Ce sont exactement les niveaux de distribution spatiale proposés par Schraft *et al.* [Schraft *et al.*, 2005] et représentés sur la Figure 2.13. Bien entendu, comme mis en avant par Oberer et Schraft [Oberer et Schraft, 2007], c'est l'évolution des technologies qui a permis la disparition progressive des barrières de sécurité : avec l'apparition des caméras de sécurité, des zones ont pu être délimitées autour du robot (systèmes pré-collision, sécurité déportée à l'extérieur du robot), tandis que les capteurs embarqués sur le robot (force, capacitif, tactile) et les évitements de collision ont permis une interaction encore plus rapprochée (systèmes post-collision, sécurité interne au robot). Cette classification est représentée sur la Figure 2.14.

Lorsque le niveau de sécurité autorise les opérateurs à s'approcher d'un robot, il est toujours intéressant de délimiter plusieurs zones autour de celui-ci : ceci permet au robot d'adapter son comportement en fonction de la distance des opérateurs. Ainsi, lorsque le robot est seul, il peut fonctionner à plein régime ; lorsqu'un opérateur est présent dans sa zone atteignable, le robot fonctionne au ralenti ; lorsqu'un opérateur est très proche (contact physique possible), le

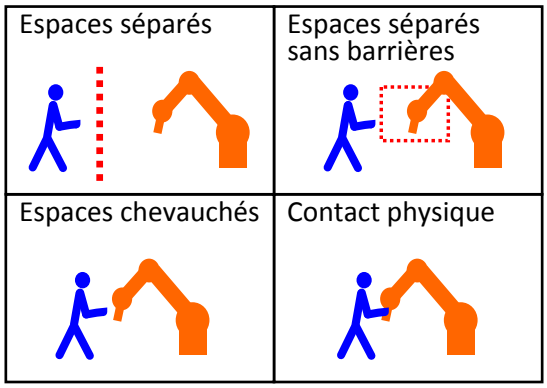


FIGURE 2.13 – La distribution spatiale homme-robot selon Schraft *et al.* [Schraft *et al.*, 2005] : depuis les espaces de travail isolés vers un espace commun autorisant le contact physique

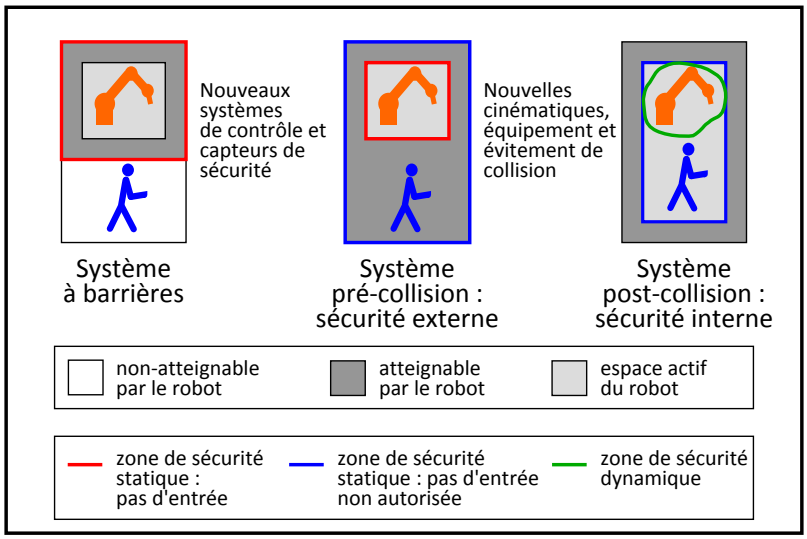


FIGURE 2.14 – Le rapprochement des opérateurs et des robots, rendu possible par l'évolution des technologies, selon Oberer et Schraft [Oberer et Schraft, 2007]

robot s'arrête ou passe en mode collaboratif. Basé sur ce principe, Haddadin *et al.* [Haddadin *et al.*, 2009] ont proposé plusieurs modes de fonctionnement d'un robot Kuka LWR3 : mode autonome (aucun humain n'est présent), mode amical (une personne est présente dans la zone de travail), mode collaboratif (une personne est présente avec l'intention de collaborer), mode de récupération d'erreur (une erreur est survenue).

Dans le domaine de l'industrie automobile, Shi *et al.* [Shi *et al.*, 2012] ont catégorisé les systèmes collaboratifs homme-robot selon trois niveaux qui déterminent le comportement du robot à proximité d'un opérateur :

- Niveau bas : l'opérateur n'entre pas dans la zone de travail du robot ; l'opérateur n'interagit pas directement avec le robot mais avec un système de transfert de pièces ;
- Niveau moyen : l'opérateur charge des pièces directement sur la tête du robot ; celui-ci fonctionne de manière dégradée et ne bouge pas tant que l'opérateur n'a pas quitté la zone de travail ;
- Niveau haut : l'opérateur peut pénétrer dans la zone de travail du robot ; des capteurs

permettent de modifier la vitesse et les trajectoires du robot si nécessaire.

Ces trois niveaux rejoignent ceux proposés par Oberer et Schraft [Oberer et Schraft, 2007] et présentés plus haut.

2.1.3.3 La distribution temporelle

La distribution temporelle de la collaboration concerne la façon dont les agents effectuent leurs actions dans le temps. Les activités du groupe peuvent intervenir en temps réel à des moments identiques : on parle de collaboration synchrone. A l'inverse, elles peuvent intervenir en différé à des moments différents : on parle de collaboration asynchrone [Chellali, 2009].

Helms *et al.* [Helms *et al.*, 2002] ont proposé une classification intéressante de distribution temporelle pour la collaboration homme-robot (voir Figure 2.15). Le robot et l'homme peuvent agir de manière complètement indépendante (tâches différentes, pièces différentes) : on se rapproche de situations de coaction ou de coprésence. Ils peuvent également agir de manière synchronisée : le robot et l'homme effectuent leurs opérations séquentiellement, l'un après l'autre, sur la même pièce (collaboration asynchrone). Enfin, la collaboration synchrone peut prendre deux formes : simultanée (le robot et l'homme effectuent leurs tâches respectives en même temps sur la même pièce) ou assistée (le robot et l'homme effectuent la même tâche en commun sur la même pièce). La différenciation entre les deux dernières configurations de collaboration synchrone peut être parfois difficile et prêter à discussion en fonction des situations.

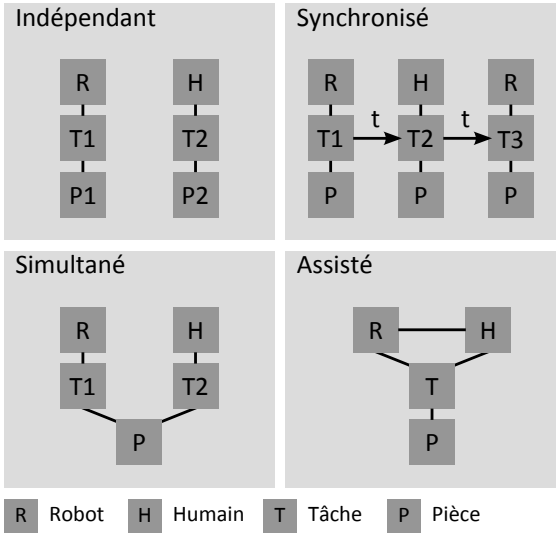


FIGURE 2.15 – La distribution temporelle homme-robot selon Helms *et al.* [Helms *et al.*, 2002]

Krüger *et al.* [Krüger *et al.*, 2009] ont repris les principes de Helms *et al.* en divisant les systèmes collaboratifs en deux groupes : les sytèmes à partage d'espace (*workplace sharing*) et les systèmes à partage d'espace et de temps (*workplace and time sharing*). Le premier groupe concerne les systèmes où l'opérateur et le robot partagent le même espace de travail mais effectuent des tâches différentes (assemblage ou manipulation) : elles se rapprochent des situations de collaboration asynchrone. Les systèmes du second groupe autorisent l'opérateur et le robot à effectuer le même type de tâche en même temps : on se rapproche alors de la collaboration synchrone. Ces deux systèmes de partage sont représentés sur la Figure 2.16.

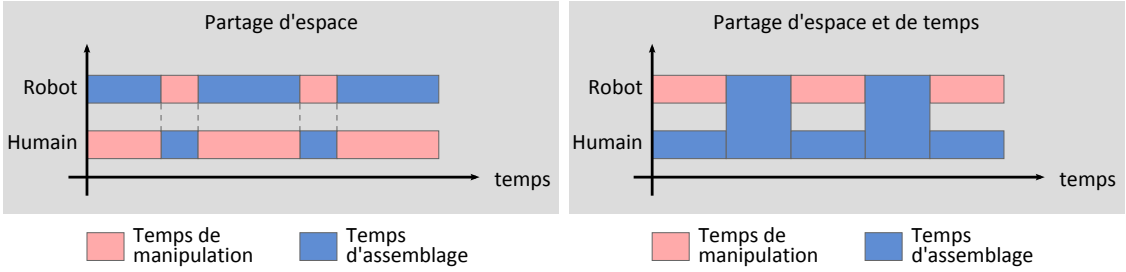


FIGURE 2.16 – La distribution temporelle homme-robot selon Krüger *et al.* [Krüger *et al.*, 2009]

2.2 L'acceptabilité de la collaboration homme-robot

L'adoption d'une nouvelle technologie par de potentiels utilisateurs n'est jamais aisément acquise : différents facteurs peuvent amener cette technologie à être acceptée ou au contraire rejetée. L'introduction de robots dans l'environnement du travail ou dans la vie quotidienne n'échappe pas à cette considération. Dès lors, il s'agit de déterminer dans quel cadre l'introduction des robots est accepté par les utilisateurs, spécialement dans des situations de collaboration avec des opérateurs.

Dans cette section, nous commençons par définir la notion d'acceptabilité en présentant les différents modèles qui décrivent ses composantes. Puis, au regard d'un de ces modèles, nous exposons les facteurs importants qui peuvent influencer ces composantes dans l'acceptabilité de la collaboration homme-robot.

2.2.1 Vers une définition de l'acceptabilité

Dans le contexte d'adoption d'une nouvelle technologie, l'acceptabilité regroupe les critères qui vont conditionner l'intention d'utiliser cette technologie. En ergonomie, la distinction est souvent faite entre l'**acceptabilité** (*acceptability* en anglais) et l'**acceptation** (*acceptance* en anglais). Bobillier-Chaumon et Dubois [Bobillier-Chaumon et Dubois, 2009] ont défini l'acceptabilité comme la manière qu'a un individu de se représenter une technologie et son utilisation future, tandis que la notion d'acceptation, complémentaire à l'acceptabilité, désigne la façon dont un individu perçoit au gré des situations quotidiennes les enjeux liés à cette technologie et y réagit. Ainsi, l'étude de l'acceptabilité a une approche *a priori* : elle cherche à évaluer les probabilités d'appropriation d'une technologie, avec l'objectif de limiter les risques de rejet probables, et exprime ainsi un degré potentiel d'acceptation. A l'inverse, l'acceptation se focalise sur l'usage réel des technologies (certains facteurs ne se dévoilant qu'à l'usage), le vécu des personnes et expérimente concrètement l'acceptabilité des technologies. Bobillier-Chaumon et Dubois ont toutefois indiqué que des tests utilisateurs permettaient d'étudier l'utilisabilité des technologies, toujours dans une optique de prédiction et d'acceptabilité.

Dans le cadre de la thèse, nous sommes clairement focalisés sur l'étude de l'**acceptabilité** : nous étudions des situations de collaboration homme-robot qui n'existent pas encore à l'heure actuelle et nous désirons recueillir les impressions des opérateurs avant une intégration potentielle en usine.

Afin de déterminer les différentes composantes de l'acceptabilité, plusieurs notions ont été utilisées dans la littérature, comme celles d'utilité et d'utilisabilité. Dans le domaine des EIAH (environnements informatiques pour l'apprentissage humain), Tricot *et al.* [Tricot *et al.*, 2003] ont tenté de déterminer les relations entre l'utilité (définie comme l'efficacité pédagogique du lo-

giciel), l'utilisabilité (définie comme la maniabilité du système) et l'acceptabilité (définie comme la décision d'utiliser le système). Même si les auteurs affirment que tout type de relations causales peut exister entre ces trois notions, il n'est pas toujours facile d'en avoir une vision claire et plusieurs modèles sont apparus pour apporter leur interprétation.

Dans la littérature, les premiers modèles de l'acceptabilité ont été utilisés pour l'adoption des ordinateurs par les utilisateurs. Celui le plus cité est probablement le TAM (*Technology Acceptance Model*) proposé par Davis [Davis, 1989]. Afin de prédire l'utilisation future de nouvelles technologies, ce modèle décompose l'acceptabilité en deux composantes : l'**utilité perçue** et la **facilité d'utilisation perçue**. L'utilité perçue est définie comme « le degré selon lequel un individu croit que l'utilisation d'un système particulier va améliorer sa performance au travail ». La facilité d'utilisation perçue concerne « le degré selon lequel un individu croit que l'utilisation du système va demander peu d'effort ». Davis a mis en place des échelles permettant de mesurer ces deux critères et a indiqué que l'influence de l'utilité perçue était plus forte que celle de la facilité d'utilisation perçue sur l'usage futur.

D'autres modèles sont apparus pour définir l'acceptabilité, avec une vision différente ou complémentaire du TAM. Venkatesh *et al.* [Venkatesh *et al.*, 2003] ont présenté une revue des différents modèles existants et ont proposé leur propre modèle visant à les unifier : le modèle UTAUT (*Unified Theory of Acceptance and Use of Technology*, voir Figure 2.17). Ce modèle met en avant quatre déterminants directs de l'acceptabilité : l'**attente de performance**, l'**attente d'effort**, l'**influence sociale** et les **conditions facilitatrices**. Les deux premiers éléments rejoignent les définitions d'utilité perçue et de facilité d'utilisation perçue du TAM de Davis [Davis, 1989]. L'influence sociale correspond au « degré selon lequel un individu croit que des personnes importantes pensent qu'il devrait utiliser le nouveau système ». Les conditions facilitatrices concernent « le degré selon lequel un individu croit qu'une infrastructure organisationnelle et technique existe pour supporter l'utilisation du système ». Ces quatre déterminants directs peuvent être influencés par des modérateurs : le sexe, l'âge, l'expérience et le caractère imposé de l'utilisation.

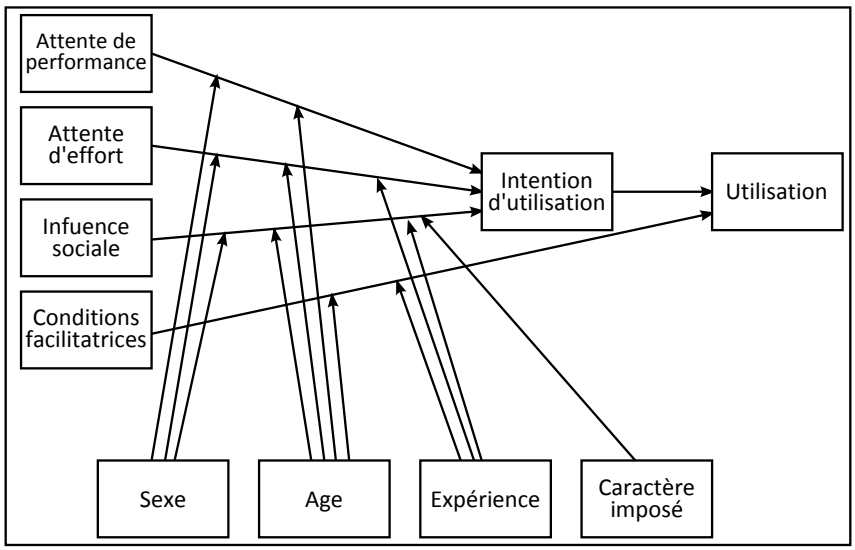


FIGURE 2.17 – Le modèle UTAUT des déterminants et des modérateurs de l'acceptabilité d'un système selon Venkatesh *et al.* [Venkatesh *et al.*, 2003]

Nielsen [Nielsen, 1993] a proposé une vision quelque peu différente de l'acceptabilité avec son

propre modèle qui a lui aussi été beaucoup utilisé (voir Figure 2.18). L'acceptabilité y est divisée en acceptabilité sociale et acceptabilité pratique, qui regroupe les notions de coût, de compatibilité et de fiabilité. On retrouve également dans l'acceptabilité pratique les notions d'utilité (*utility*) et d'utilisabilité (*usability*), regroupées dans le terme d'utilité pratique (*usefulness*). Enfin, l'utilisabilité correspond à la facilité d'utilisation du système, son efficacité perçue, sa gestion des erreurs et son caractère plaisant. L'avantage de ce modèle par rapport aux autres est que l'on peut l'interpréter en termes d'acteurs : l'acceptabilité sociale se réfère plutôt à l'acceptabilité vue de la société, l'acceptabilité pratique concerne le point de vue de l'organisation (entreprise), tandis que l'utilisabilité se focalise sur l'individu.

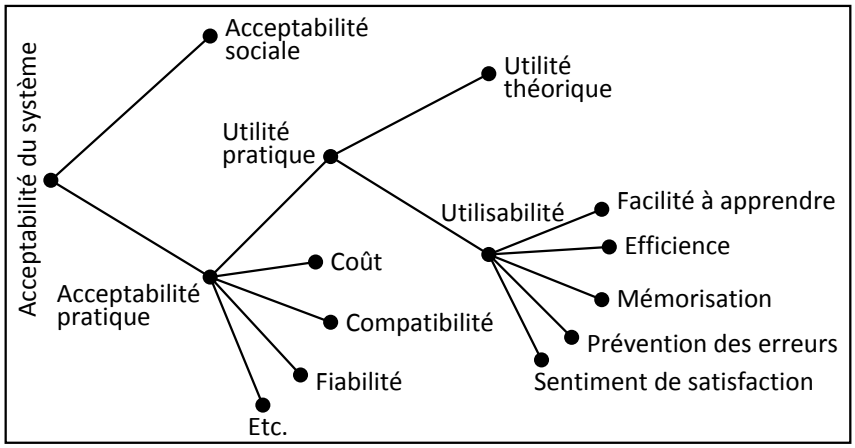


FIGURE 2.18 – Le modèle des composantes de l'acceptabilité d'un système selon Nielsen [Nielsen, 1993]

Récemment, de Graaf et Ben Allouch [de Graaf et Ben Allouch, 2013] ont proposé une revue très intéressante des composantes importantes dans l'acceptabilité des robots sociaux (c'est-à-dire engageant une interaction sociale avec les utilisateurs, contrairement aux robots industriels). L'étude de l'acceptabilité y est divisée en trois composantes principales : les convictions comportementales (*attitudinal beliefs*), les convictions sociales (*social normative beliefs*) et les convictions contextuelles (*control beliefs*). Tout d'abord, les convictions comportementales sont définies comme l'évaluation du robot (ou de son utilisation) par l'utilisateur. Elles sont divisées en composantes utilitaires (*utilitarian factors*) et hédonistes (*hedonic factors*). Les composantes utilitaires concernent l'aspect pratique et utilisable d'un produit : elles rejoignent les notions d'utilité et de facilité d'utilisation des modèles TAM et UTAUT. Les composantes hédonistes sont reliées à l'expérience de l'utilisateur pendant l'utilisation du produit, avec les notions de plaisir et d'attrait. Ensuite, les convictions sociales se focalisent sur la perception des utilisateurs de ce que les autres personnes pensent de l'utilisation du robot. Enfin, les convictions contextuelles désignent la présence d'éléments facilitateurs ou d'obstacles à l'utilisation du système. Les auteurs ont également ajouté l'influence des caractéristiques de l'utilisateur, tels que l'âge, le sexe ou la culture. Cette décomposition de l'acceptabilité par de Graaf et Ben Allouch [de Graaf et Ben Allouch, 2013] se rapproche en grande partie des notions mises en avant dans le modèle UTAUT de Venkatesh *et al.* [Venkatesh *et al.*, 2003] (influence sociale, conditions facilitatrices). Un aspect nouveau apparaît cependant, celui des composantes hédonistes, que l'on retrouve également dans le modèle de Nielsen [Nielsen, 1993] sous le terme de sentiment de satisfaction (*subjectively pleasing*).

L'ensemble des modèles présentés fournit un aperçu des différentes composantes qui rentrent

en jeu pour décrire l'acceptabilité. Ces composantes regroupent des notions globales, telles que l'utilité perçue, l'utilisabilité ou le sentiment de satisfaction. Il est important de comprendre que ces composantes peuvent être influencées par des facteurs variés qu'il s'agit de déterminer.

Dans la suite, nous gardons à l'esprit les considérations de chaque modèle. Mais c'est le modèle global de Nielsen que nous utilisons pour décomposer l'acceptabilité et présenter les facteurs de l'acceptabilité de la collaboration homme-robot. Il permet en effet d'aborder toutes les notions importantes de ce thème de recherche et de se les représenter de manière clarifiée.

2.2.2 Les composantes de l'acceptabilité de la collaboration homme-robot

Dans cette section, nous utilisons le modèle de Nielsen [Nielsen, 1993] pour aborder les composantes importantes de l'acceptabilité de la collaboration homme-robot et présenter les différents facteurs qui peuvent influencer ces composantes. La collaboration homme-robot étant un sous-domaine de l'interaction homme-robot, certains de ces facteurs relèvent plus de l'interaction, voire des attributs des robots, tandis que d'autres sont plus focalisés sur la collaboration.

2.2.2.1 L'acceptabilité sociale

L'acceptabilité sociale concerne essentiellement des notions éthiques et la manière dont l'introduction des robots dans la vie de tous les jours et dans les environnements de travail est perçue par la société au sens large.

L'intérêt premier de la collaboration homme-robot est celle de la complémentarité des compétences entre hommes et robots. Ainsi, les robots sont utilisés pour des tâches répétitives, fatigantes ou dangereuses : Arkin [Arkin, 2008] parle des *3D jobs*, pour *dull*, *dirty*, *dangerous* (ennuyeux, sale, dangereux). Les opérateurs travaillent alors sur des postes avec moins de contraintes ergonomiques (meilleure santé du travail) et requiérant plus d'intelligence. Cependant, la question de la remplaçabilité des hommes par des robots, notamment relevée par Decker [Decker, 2007], inquiète de plus en plus : la robotisation et l'automatisation du milieu de travail sont souvent perçues négativement par les opérateurs comme synonymes de perte d'emploi et de chômage. Cette représentation est cependant discutée : les entreprises voient dans la robotisation un facteur de maintien de l'emploi et des usines [David, 2012].

D'autres questions plus subtiles commencent à se poser. Etant donné que les robots deviennent de plus en plus autonomes et pourront même, à l'avenir, étendre leur panel de compétences en apprenant de nouvelles tâches de manière continue, il s'agit de déterminer qui sera légalement responsable de leurs actions et de leurs erreurs : est-ce le fabricant, le propriétaire, l'utilisateur ou encore le robot lui-même ? Dans des situations comme l'assistance aux personnes âgées ou l'éducation des enfants, ces considérations sont cruciales, comme mis en avant par Decker [Decker, 2007] et Asaro [Asaro, 2007]. Weng *et al.* [Weng *et al.*, 2009] ont envisagé une société de co-existence homme-robot (*human-robot co-existence society*) d'ici à 2030 et ont repris les notions de légalité sur plusieurs plans : la sécurité, la consommation d'énergie, la programmation d'émotions, l'implantation d'intelligence artificielle « humaine » dans les robots...

Enfin, il est important de noter que ces aspects éthiques sont largement dépendants de la culture. Le développement des robots dans les pays asiatiques, comme le Japon et la Corée du Sud, est très bien accueilli par la société, voire encouragé par les gouvernements, tandis que les pays européens ont une vision plus neutre ou négative des robots dans la société. Kaplan [Kaplan, 2004] a fourni un aperçu très intéressant des différences culturelles actuelles dans la perception des robots au regard de la littérature et des mythes occidentaux et orientaux.

2.2.2.2 L'acceptabilité pratique

Dans le modèle de Nielsen [Nielsen, 1993], l'acceptabilité pratique concerne la mise en place du système, avec des notions de coût, de fiabilité, de sécurité. Elle peut être considérée comme l'acceptabilité vue par l'organisation (l'entreprise). La notion d'utilisabilité, qui fait aussi partie de l'acceptabilité pratique, est présentée à part dans la Section 2.2.2.3.

Coût

La notion de coût est une dimension importante de l'acceptabilité. Des études de marchés sont menées, au niveau international ou au niveau des entreprises, pour savoir si l'intégration d'un système de collaboration homme-robot est acceptable ou non sur le plan financier.

Dans le cadre du projet européen *ARFLEX* (*Adaptive Robots for FLEXible manufacturing systems*) financé par le FP6, une étude de marché a été menée auprès de plusieurs entreprises suisses et européennes afin de déceler les besoins et les réticences de chacunes concernant l'automatisation de leurs systèmes. Grüninger *et al.* [Grüninger *et al.*, 2009] ont résumé les résultats de ces investigations. Il est globalement apparu que la production en petite série et la grande fréquence de changement des lignes de production étaient des facteurs limitant l'utilisation de systèmes robotisés, essentiellement pour les petites et moyennes entreprises. C'est pour ce type d'entreprises que des systèmes d'automatisation hybrides (dans lesquels un opérateur et un robot travaillent en parallèle ou en collaboration) ont leur intérêt.

Hägele *et al.* [Hägele *et al.*, 2002] ont raisonné sur la production totale désirée d'un produit donné et sur le coût de ce produit, en comparant des lignes manuelles, automatisées et hybrides. Les lignes automatisées deviennent rentables lorsque la production désirée est importante, tandis que les lignes manuelles restent préférables pour des productions de petite taille. Les systèmes hybrides représentent un avantage financier à la convergence des deux systèmes précédents, lorsqu'une production moyenne est envisagée, comme le montre la Figure 2.19. Ceci confirme le fait que l'automatisation hybride constitue un bénéfice non négligeable pour les PMEs.

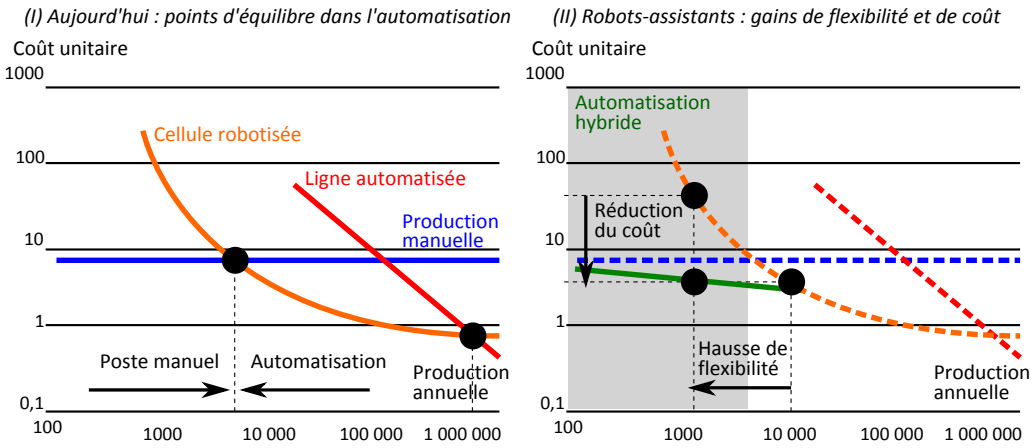


FIGURE 2.19 – Gains financiers potentiels de postes hybrides homme-robot par rapport à des postes manuels et automatisés [Hägele *et al.*, 2002]

Krüger *et al.* [Krüger *et al.*, 2009] ont apporté une vision plus concrète en raisonnant sur la valeur actuelle nette (*net present value*) des entreprises. Etant donnée une tâche d'assemblage prédéfinie, plusieurs systèmes ont été comparés : manuel, automatisé et hybride. En estimant les temps de cycle de chaque système et en prenant en compte la production totale désirée, le nombre

nécessaire de robots et d'opérateurs pour l'assemblage a été déduit et les revenus finaux de l'entreprise ont été calculés. Les résultats de cette comparaison ont montré que l'automatisation hybride possédait le temps de cycle le plus bas (voir Figure 2.20) et nécessitait le moins de robots et d'opérateurs pour la tâche d'assemblage. C'est par conséquent le système le plus avantageux financièrement pour l'entreprise.

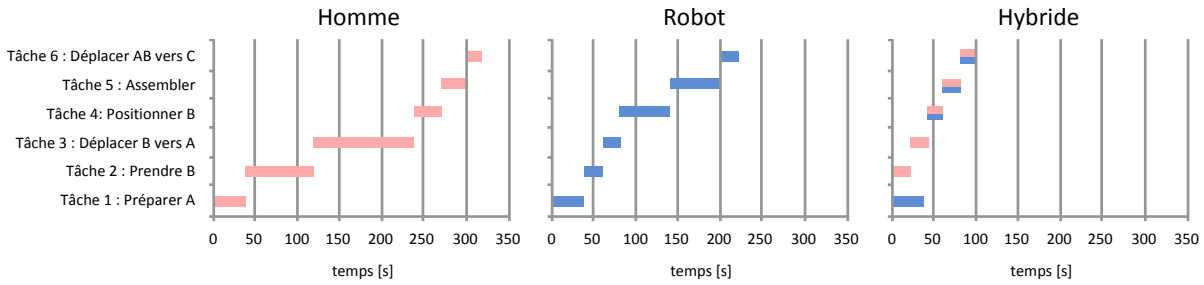


FIGURE 2.20 – Comparaison des temps de cycle de postes manuels, automatisés et hybrides [Krüger *et al.*, 2009]

Ces différentes études ont été réalisées dans des contextes précis. Il est difficile d'en tirer des généralités : l'acceptabilité économique d'un système de collaboration homme-robot est à évaluer en fonction du type d'application.

Sécurité

Dans le domaine industriel, les notions de sécurité et de fiabilité sont primordiales et sont entièrement régies par des normes et des certifications qui préconisent ce qui est acceptable ou non. La norme ISO 10218 traite spécifiquement de la sécurité des robots en environnement industriel et notamment du partage de l'espace de travail entre l'opérateur et le robot. Cette norme impose des contraintes sur le comportement du robot en mode coopératif (lorsque l'opérateur est dans l'environnement du robot) : limitation en vitesse (250 mm/s), en puissance (80 W) ou en force (150 N). La norme ISO 13855 préconise une distance de sécurité entre le dispositif de protection (les capteurs de détection) et la zone dangereuse (le robot). Elle correspond à $S = K * T + C$, où K est la vitesse d'approche de l'objet (une personne), T est le temps de réaction du robot (détection + arrêt) et C est une distance supplémentaire de précaution (dépendant du système utilisé). Cette norme est souvent contraignante pour des applications nécessitant une interaction rapprochée entre l'opérateur et le robot. L'ensemble des normes est interprété par des organismes de certification, comme la BGIA (institut allemand pour la sécurité et la médecine du travail), qui fournissent ensuite des préconisations d'application. Les industries doivent ensuite suivre au mieux ces préconisations afin que leurs projets ou technologies soient certifiés et utilisables.

Historiquement, les premiers systèmes de sécurité autour des robots étaient simplement des **barrières physiques** : il était alors impossible de pénétrer dans la zone de travail des robots. Certaines de ces barrières sont désormais remplacées par des **barrières immatérielles** (voir Figure 2.21) : il s'agit de systèmes laser (une dimension) détectant le franchissement d'un plan par un objet quelconque (comme un opérateur). Son principal avantage concerne le gain de place par rapport à des barrières physiques (réduction de l'espace physique non utilisé) et son temps de réaction. Il existe des systèmes laser pouvant balayer un espace donné dans le plan (deux dimensions). On peut ainsi définir plusieurs zones de sécurité à proximité du robot (hors d'atteinte, en approche, arrêt) et adapter le comportement du robot en fonction des obstacles détectés. Les lasers SICK ou Hokuyo en sont un exemple.

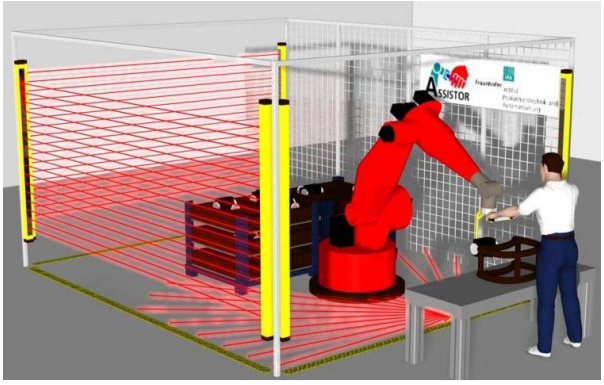


FIGURE 2.21 – Le système *PowerMate* et ses barrières immatérielles détectant l'intrusion de personnes dans la zone de travail du robot [Schraft *et al.*, 2005]

Des systèmes de vision sont ensuite apparus afin d'améliorer la sécurité de la zone de travail des robots tout en permettant aux opérateurs de s'en approcher. On peut utiliser des systèmes de **caméras optiques** pour surveiller l'environnement de travail de manière globale. Le projet *SIMERO* [Gecks et Henrich, 2004] a utilisé un système de supervision à base de 4 caméras à niveaux de gris et a appliqué des méthodes de différence d'image pour détecter des collisions et planifier des mouvements : les images courantes étaient comparées à des images de référence pour visualiser l'intrusion d'objets extérieurs dans l'environnement.

Les **caméras à vision stéréoscopique** permettent de repérer la profondeur des objets observés, par détection de points d'intérêt et triangulation. Le SafetyEYE, développé par Pilz, est un système doté de trois caméras offrant une vision stéréoscopique et permet de détecter la pénétration d'objets dans des zones de l'espace prédéfinies par l'utilisateur (voir Figure 2.22). Son principal avantage est qu'il respecte toutes les normes et standards importants de sécurité et peut donc être utilisé pour des applications certifiées. Le même principe a été utilisé par Krüger *et al.* [Krüger *et al.*, 2005] pour détecter la position exacte des mains de l'opérateur sur le plan de travail.

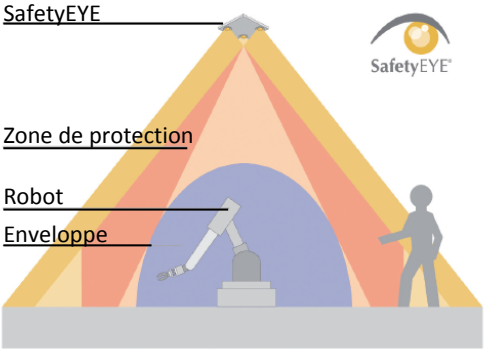


FIGURE 2.22 – Le système de surveillance SafetyEYE pour délimiter des zones de sécurité autour du robot

Les **caméras de profondeur** sont basées sur la génération de rayons infrarouges et permettent d'obtenir un nuage de points de la scène observée par différentes méthodes : calcul du temps de vol ou triangulation. La société PMDTec (*Photonic Mixer Device Technologies*) est

spécialisée dans la conception de caméras de profondeur à temps de vol. Ces caméras sont actuellement utilisées dans des applications diverses, notamment dans l'industrie automobile pour la capture de l'environnement de robots. Le projet *Lynkeus* [Ringbeck et Hagebeuker, 2007] visait à démontrer l'intérêt de cette technologie à travers des applications de coopération homme-robot et de bin-picking. Un autre exemple de caméra de profondeur est la Kinect de Microsoft, qui dispose d'algorithmes de détection des utilisateurs dans la scène (extraction du squelette).

La plateforme *JAHIR* (*Joint-Action for Humans and Industrial Robots*) [Lenz *et al.*, 2012] fusionne les données de plusieurs caméras de profondeur pour détecter les bras des opérateurs à proximité du robot (voir Figure 2.23). Le robot réagit de sorte à faciliter la tâche des opérateurs, en évitant les collisions et en s'arrêtant dès qu'il y a contact. Plutôt que de surveiller des espaces autour du robot, ce type de système peut également servir à reconnaître les activités des opérateurs et obtenir une compréhension plus fine de l'environnement. Le robot devient ainsi plus intelligent et peut mieux réagir pour garantir la sécurité des opérateurs. C'est l'objectif d'une deuxième thèse entreprise dans le cadre de la chaire « PSA Peugeot Citroën - Robotique et Réalité Virtuelle », sur la reconnaissance de gestes [Coupeté *et al.*, 2014].

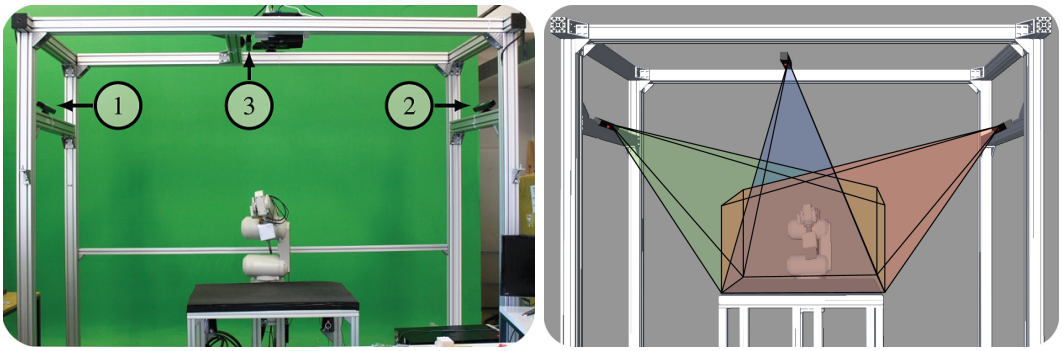


FIGURE 2.23 – La plateforme *JAHIR* et ses caméras de profondeur pour superviser la zone proche du robot [Lenz *et al.*, 2012]

Lorsqu'une interaction rapprochée est nécessaire entre le robot et l'opérateur, les systèmes de vision ne sont plus suffisants pour garantir la sécurité. Ainsi, les nouveaux robots collaboratifs sont aujourd'hui développés de manière à intégrer dès leur conception différents **capteurs embarqués** les rendant intrinsèquement sûrs pour l'interaction avec des opérateurs. Le bras articulé Kuka LWR comporte des capteurs de couple à jauge de contrainte dans chacune de ses articulations [Albu-Schäffer *et al.*, 2007], lui permettant de repérer toute collision. Dans le même esprit, le robot ABB Frida [Kock *et al.*, 2011] ainsi que le robot Universal UR5 détectent les collisions par surveillance des courants moteurs de chaque articulation. Avec son package *Safe Interaction*, la société allemande MRK Systeme permet de rajouter des capteurs embarqués sur des robots initialement non sécurisés (comme le Kuka KR5-SI) : il s'agit d'une mousse qui enrobe le robot initial (pour amortir les collisions) et qui comporte des capteurs tactiles et capacitifs permettant de détecter une présence à une portée de 30 cm (voir Figure 2.24).

Dans le cadre des projets européens *Phriends* et *SMErobot*, Haddadin *et al.* [Haddadin *et al.*, 2007] ont mené des études pour évaluer la sécurité de l'interaction physique homme-robot au regard des normes en vigueur. Des tests d'impact sur mannequin, comme ceux représentés sur la Figure 2.25, ont été réalisés avec le robot Kuka LWR3 pour mesurer divers indices de blessure (tête, torse). Les résultats ont montré que les impacts du robot présentaient très peu de danger pour l'opérateur : les indices de blessure sont restés très bas (25 points sur une échelle

FIGURE 2.24 – Le robot Kuka LWR (structure mécanique détectant les collisions) [Haddadin *et al.*, 2011], le robot ABB Frida (mousse protectrice et détection des collisions) et le robot Kuka KR5-SI (mousse protectrice dotée de capteurs tactiles et capacitifs)

de 1000) pour des vitesses atteignant jusqu'à 2 m/s. Oberer et Schraft [Oberer et Schraft, 2007] ont effectué des études similaires en simulant des crash-tests par des méthodes d'éléments finis. Les résultats ont été semblables à ceux de Haddadin *et al.* : les impacts ont présenté très peu de danger pour l'opérateur par rapport aux normes imposées. Oberer et Schraft ont également insisté sur la nécessité d'adapter correctement les techniques et critères des crash-tests du domaine automobile vers le domaine de la robotique, en étudiant plus profondément la biomécanique du corps humain. Les résultats de ces crash-tests posent globalement la question de la pertinence des indices utilisés actuellement dans le domaine de la robotique et de la pertinence des normes ISO en vigueur qui imposent des contraintes très fortes sur les robots.

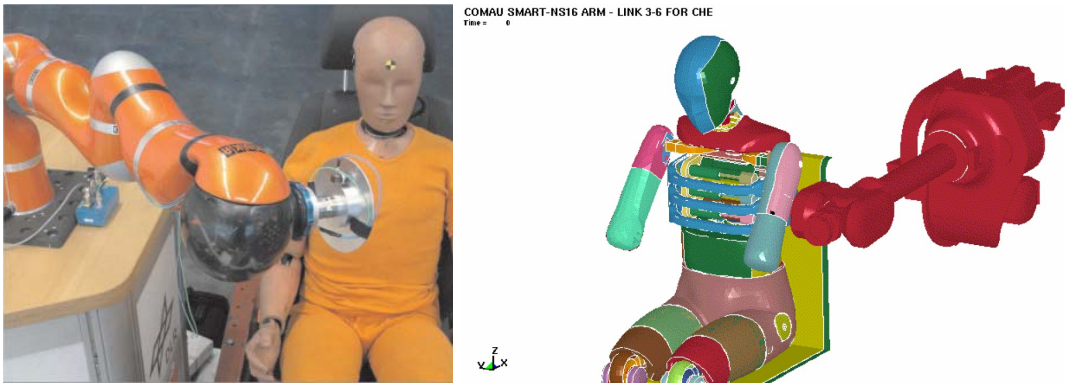


FIGURE 2.25 – Evaluation de la sécurité des robots par crashtest [Haddadin *et al.*, 2007] et simulation par éléments finis [Oberer et Schraft, 2007]

Dans un contexte d'environnements industriels flexibles, dans lesquels des robots et des opérateurs peuvent collaborer physiquement et les robots peuvent apprendre de nouvelles tâches, Eder *et al.* [Eder *et al.*, 2014] ont mis en avant la nécessité de réfléchir à de nouvelles approches pour assurer et certifier la sécurité de ces nouveaux systèmes. Eder *et al.* s'intéressent notamment à la sécurité des systèmes robotiques apprenant par démonstration et à l'intégration de modèles cognitifs du comportement humain. Actuellement, une nouvelle norme est en préparation (ISO 15066) : elle est destinée à la sécurité des opérations collaboratives avec des robots industriels et se focalise sur une approche centrée sur les tâches collaboratives (et non plus les robots eux-mêmes).

Ergonomie

La santé physique des opérateurs est constamment surveillée dans les entreprises : les postes physiquement trop pénibles ou dangereux sont parfois amenés à être remaniés. L'intérêt des systèmes collaboratifs est qu'ils peuvent améliorer l'ergonomie des postes de montage et réduire les accidents de travail, ce qui en fait des critères bénéfiques pour l'acceptabilité de ce type de système.

2.2.2.3 L'utilisabilité

L'utilisabilité d'un système peut être considérée comme l'acceptabilité du point de vue de l'opérateur, lors de son utilisation. La norme ISO 9241 reprend les concepts de Nielsen [Nielsen, 1993] et définit l'utilisabilité selon les trois critères suivants : l'efficacité (capacité du système à atteindre ses objectifs, regroupant la facilité d'apprentissage, la facilité d'appropriation et la prévention des erreurs), l'efficience (optimalité des moyens utilisés pour atteindre les objectifs) et la satisfaction. Les facteurs qui rentrent en jeu dans l'utilisabilité sont généralement subjectifs (ils dépendent largement de l'utilisateur concerné), d'où l'intérêt d'effectuer des tests utilisateurs pour les évaluer.

La notion d'utilisabilité se rapproche de celle des convictions comportementales (*attitudinal beliefs*) exposée par de Graaf et Ben Allouch [de Graaf et Ben Allouch, 2013]. Elle est définie comme l'évaluation du robot (ou de son utilisation) par l'utilisateur et est divisée en composantes utilitaires (utilité perçue, facilité d'utilisation), rejoignant les notions d'efficacité perçue et d'efficience, et en composantes hédonistes (plaisir, attrait), rejoignant la notion de satisfaction. Beer *et al.* [Beer *et al.*, 2011] ont également proposé un point de vue intéressant de l'acceptabilité centrée essentiellement sur les caractéristiques des robots : leur fonctionnalité, leur sociabilité et leur apparence. On y retrouve implicitement les notions de composantes utilitaires et hédonistes.

Dans la suite, nous exposons les facteurs liés à l'utilisabilité de la collaboration homme-robot en considérant ses composantes utilitaires et hédonistes. Etant donné que, à l'heure actuelle, certaines de ces composantes sont assez peu traitées dans le domaine industriel (surtout au niveau des composantes hédonistes), une grande partie de ces facteurs provient du domaine de l'interaction sociale entre hommes et robots.

Composantes utilitaires

Comme définies par de Graaf et Ben Allouch [de Graaf et Ben Allouch, 2013], les composantes utilitaires concernent l'aspect pratique et utilisable d'un produit. L'utilité perçue et la facilité d'utilisation en font partie. De Graaf et Ben Allouch ont indiqué que ces composantes pouvaient être influencées par les notions d'adaptabilité et d'intelligence du robot : l'adaptabilité représente la capacité du système à s'adapter aux besoins changeants de l'utilisateur, tandis que l'intelligence concerne la représentation que se fait l'utilisateur du niveau d'intelligence du robot. Dans la littérature, un certain nombre de tests utilisateurs ont été menés pour évaluer l'acceptabilité selon ces critères.

Pour le positionnement d'objets, Yamada *et al.* [Yamada *et al.*, 1999] ont mené des études pour adapter et valider leurs algorithmes de contrôle à impédance variable sur leur système *Skill-Assist* (un robot-assistant de type IAD). Quatre sujets ont procédé à des tests sur le système dans une tâche de positionnement précis et ont donné leurs impressions quant à la facilité de l'opération. Les résultats ont permis de détecter les paramètres optimaux d'inertie et de viscosité du système et de répondre au mieux aux attentes des utilisateurs.

De Santis *et al.* [De Santis *et al.*, 2008] ont utilisé la réalité virtuelle pour tester trois systèmes différents dans la conception d'un fauteuil roulant muni d'un bras robotisé. L'objectif de l'étude était de tester la faisabilité et l'utilisabilité d'un tel fauteuil. L'utilisateur était placé dans un

fauteuil roulant physique et devait effectuer, à l'aide d'un bras robotisé simulé virtuellement, différentes tâches de manipulation d'objets (positionnement, tri ; voir Figure 2.26). Les tests ont été menés sur 10 utilisateurs avec trois bras différents (Kuka LWR, Amtec ULWR, Mitsubishi PA-10) et les résultats ont révélé de meilleurs scores en termes d'utilisabilité avec le robot Kuka.

Dans des tâches de comanipulation entre un utilisateur et un robot, Maeda *et al.* [Maeda *et al.*, 2001] ont proposé d'estimer la position des mains de l'opérateur afin d'améliorer le contrôle du robot et ont mis en valeur une réduction de l'énergie à fournir via cette méthode. Mörtl *et al.* [Mörtl *et al.*, 2012] ont comparé trois dynamiques différentes dans la comanipulation d'un objet encombrant entre un robot et un utilisateur et ont déterminé laquelle était la plus utilisable en termes de performance, d'effort demandé et d'appréciation subjective de l'utilisateur.

Huber *et al.* ont étudié l'efficacité des systèmes *JAST* [Huber *et al.*, 2008] et *JAHIR* [Huber *et al.*, 2013] dans des tâches d'échange d'objets entre robot et utilisateur (voir Figure 2.26). Sur la plateforme *JAST*, différents modèles de mouvements du robot ont été comparés (profil de vitesse trapézoïdal, profil de vitesse biologique) pour déterminer lesquels étaient les plus intuitifs pour l'utilisateur et les plus efficaces pour effectuer la tâche rapidement. Sur la plateforme *JAHIR*, plusieurs stratégies de synchronisation pour tendre les pièces à l'opérateur ont été comparées (délais constants, mouvements déclenchés manuellement, anticipation) : l'efficacité de la tâche était améliorée lorsque le robot prédisait les actions de l'opérateur et lui fournissait les pièces juste à temps.

FIGURE 2.26 – Tests utilisateurs pour l'évaluation d'un prototype de fauteuil roulant avec bras robotisé [De Santis *et al.*, 2008] et l'échange d'objets entre un robot et un utilisateur [Huber *et al.*, 2008]

Dans le domaine industriel (cas d'étude tirés de General Motors), le projet *CHARM* (*Collaborative, Human-focused, Assistive Robotics for Manufacturing*) a proposé d'améliorer la communication entre l'opérateur et le robot, notamment en dotant le robot de gestes indiquant son intention à l'opérateur [Gleeson *et al.*, 2013]. Après avoir observé les gestes d'opérateurs effectuant des tâches d'assemblage en contexte industriel, le projet a mis en place un lexique des gestes représentant leurs intentions et a proposé de les intégrer sur un robot. La tâche d'assemblage effectuée en collaboration avec le robot doté de ces gestes a permis de rendre la collaboration plus efficace et plus intuitive lors des tâches d'assemblage.

Composantes hédonistes

Les composantes hédonistes se réfèrent à l'expérience de l'utilisateur pendant l'utilisation du robot. Elles comportent notamment les notions de plaisir et d'attrait du robot, qui peuvent être influencées par l'anthropomorphisme, le réalisme ou le niveau de sociabilité [de Graaf et Ben Allouch, 2013].

Les premiers facteurs importants au niveau hédoniste sont l'apparence et le comportement du robot : un robot imposant et bougeant brutalement a tendance à repousser les utilisateurs. Une ancienne étude par Karwowski et Rahimi [Karwowski et Rahimi, 1991] a évalué l'impact de la taille d'un robot industriel et de sa vitesse sur l'intention des opérateurs de pénétrer dans sa zone de travail. L'étude a été menée auprès de 24 opérateurs afin d'évaluer la vitesse maximale perçue comme sécurisante d'un bras robotisé et le temps minimum d'inactivité du robot perçu comme sûr avant d'entrer dans sa zone de travail, en fonction de trois critères : la taille du robot, la vitesse initiale du robot et l'exposition antérieure à un accident. Les résultats ont montré que l'estimation de la vitesse maximale sécurisante dépendait de la taille et de la vitesse maximale du robot (un gros robot était perçu comme plus dangereux), alors que l'exposition à un accident n'avait pas d'influence. Concernant l'estimation du temps minimal d'inactivité du robot avant de pouvoir intervenir, les personnes exposées à un accident antérieur avaient tendance à attendre plus longtemps.

L'une des questions les plus traitées au niveau de l'apparence des robots est celle de l'anthropomorphisme. Duffy [Duffy, 2003] a défini l'anthropomorphisme comme « la tendance à attribuer des caractéristiques humaines à des objets inanimés, des animaux ou autres dans l'optique de nous aider à rationaliser leurs actions ». Pour l'apparence, un robot anthropomorphe, ou souvent appelé humanoïde, est donc un robot qui ressemble à un humain. La première relation (également la plus connue) entre apparence anthropomorphique et familiarité a été celle de Masahiro Mori [Mori, 1970] dans les années 1970 avec la théorie de la vallée dérangeante (*uncanny valley*, voir Figure 2.27). Elle atteste que le degré de familiarité d'un robot augmente progressivement avec son niveau d'anthropomorphisme, jusqu'à atteindre un point où certains détails rendent la distinction homme-robot difficile et perturbante. Des robots trop anthropomorphes peuvent ainsi être rejetés par les utilisateurs (vallée dérangeante), à moins qu'ils ne soient tellement similaires à des humains que la distinction avec une personne ne soit plus possible (remontée de la vallée dérangeante). Pour éviter de tomber dans la vallée dérangeante et être mieux acceptés des utilisateurs, certains robots gardent donc une apparence plus fonctionnelle, caricaturale ou zoomorphique [Fong *et al.*, 2003], comme le robot Nao. A l'inverse, le positionnement d'autres robots sur la courbe de Mori (comme le Geminoid [Nishio *et al.*, 2007] ou le Telenoid [Ogawa *et al.*, 2011] du professeur Ishiguro, voir Figure 2.27) est plus délicat car l'effet de la vallée dérangeante commence à se faire ressentir. Mori a également supposé que l'effet de la vallée dérangeante se faisait plus fort lorsque les robots étaient en mouvement.

La vallée dérangeante de Mori n'ayant pas été prouvée scientifiquement, beaucoup d'études sont apparues afin de confirmer, compléter ou critiquer cet effet. Hanson [Hanson, 2006] a critiqué la vision de Mori en mettant l'accent sur l'importance de l'esthétique plutôt que le niveau de réalisme pour qu'un robot nous paraisse familier et attirant. A partir de plusieurs images de robots, d'humanoïdes ou d'humains, il est arrivé à reproduire l'effet de la vallée dérangeante, à le compenser ou même à l'inverser, en fonction de modifications subtiles des images (créant des transformations continues d'un robot mécanique à un humain). MacDorman [MacDorman, 2006] a bien retrouvé l'effet de la vallée dérangeante en comparant différentes têtes d'humanoïdes avec des images fixes, mais l'effet n'est pas apparu lors de la présentation de vidéos de différents robots.

L'apparence des robots peut influencer d'autres notions que celles directement liées à l'attraction et à la familiarité. Goetz *et al.* [Goetz *et al.*, 2003] ont attesté que l'apparence et le comportement des robots devaient refléter leur rôle et le niveau de sérieux de leur tâche pour qu'ils puissent être acceptés et écoutés par les utilisateurs. A cet effet, des tests utilisateurs ont été menés avec différentes apparences de robots (humanoïdes ou non, jeunes ou âgés, fémi-

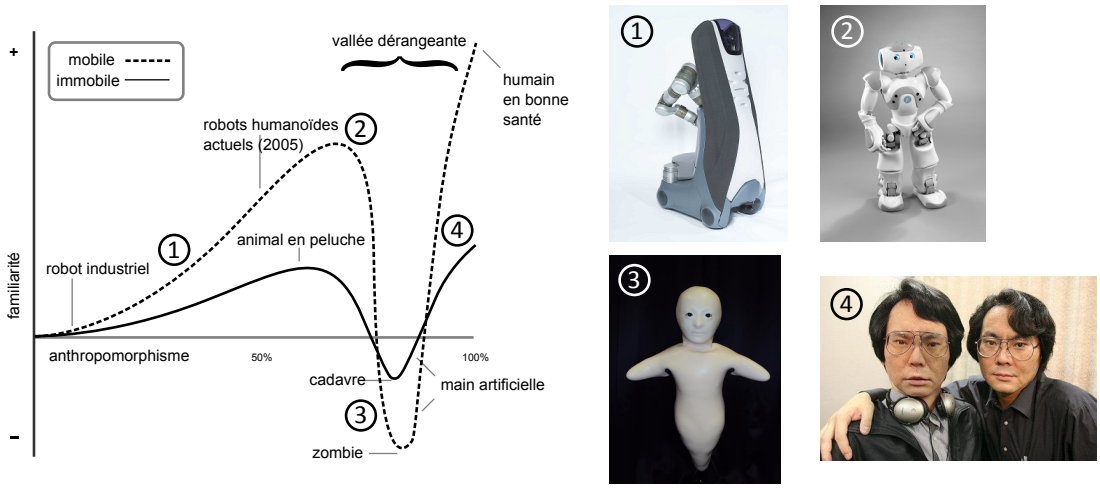


FIGURE 2.27 – La relation anthropomorphisme-familiarité et la vallée dérangeante imaginées par Mori [Mori, 1970], illustrées par MacDorman [MacDorman, 2006] et un placement de certains robots sur cette courbe (Care-O-bot, Nao, Telenoid, Geminoid). Ce placement est subjectif et reste ouvert à la discussion.

nins ou masculins) et divers scénarios de travail ou de divertissement pour déterminer quelles apparences étaient le mieux adaptées à chaque situation. Hinds *et al.* [Hinds *et al.*, 2004] ont étudié les relations entre l'anthropomorphisme et le statut du robot par rapport à l'utilisateur (superviseur, partenaire, subalterne) dans une tâche de récolte d'objets et ont déterminé que les utilisateurs avaient tendance à faire plus confiance à un humanoïde qu'à un robot d'apparence moins anthropomorphe. Syrdal *et al.* [Syrdal *et al.*, 2007] et Walters *et al.* [Walters *et al.*, 2008] ont étudié l'influence de l'apparence des robots sur l'attribution de personnalités par les utilisateurs (voir Figure 2.28). Inoue et Arai [Inoue et Arai, 2008] ont comparé différentes formes de robots (épaisseur de la tête, du tronc et des jambes) pour déterminer quels robots étaient perçus les plus entreprenants, les plus amicaux ou les plus rapides. Enfin, Kanda *et al.* [Kanda *et al.*, 2008] ont étudié l'influence de l'apparence de robots différents (un proche d'une machine, un humanoïde et un humain) sur le comportement des utilisateurs lors d'une interaction verbale : distance entretenue entre l'utilisateur et le robot, temps de réponse verbale de l'utilisateur, amplitude des mouvements.

Des études supplémentaires se sont focalisées sur le design des têtes des robots, étant donné que l'interaction sociale entre robot et utilisateur passe souvent par l'observation de la tête du partenaire. Pour leur robot social Pearl, DiSalvo *et al.* [DiSalvo *et al.*, 2002] ont étudié la pertinence et la position des caractéristiques de la tête du robot (yeux, sourcils, nez, bouche...) pour faciliter l'interaction sociale avec des utilisateurs. Goetz *et al.* [Goetz *et al.*, 2003] et Powers et Kiesler [Powers et Kiesler, 2006] ont étudié l'impact de différentes têtes de robot (jeune ou âgé, féminin ou masculin, mécanique ou humanoïde) sur la préférence des utilisateurs, leur attribution à une tâche donnée et leur intention d'écouter les conseils du robot (voir Figure 2.28).

Au-delà de l'apparence des robots, leurs mouvements peuvent également avoir une influence sur leur perception par les utilisateurs. Additionnellement aux notions de vitesse et de sécurité perçue, la question s'est posée de savoir si des mouvements biologiques (proches de ceux des humains) pouvaient améliorer l'acceptabilité des robots. La littérature sur la modélisation des mouvements humains est abondante (voir la Section 5.1.4 du Chapitre 5) et a parfois été appliquée au domaine de la robotique. Pour des mouvements de va-et-vient d'un bras robotisé

FIGURE 2.28 – Plusieurs apparences [Walters *et al.*, 2007] et têtes de robots [Powers et Kiesler, 2006] pouvant influencer l'attribution de rôles et de personnalités

industriel, Shibata et Inooka [Shibata et Inooka, 1998] ont généré différents profils de vitesse (en cloche ou en pointe, avec un pic centré ou décalé) pour déterminer ceux qui étaient le mieux perçus via des tests utilisateurs. Dans une tâche d'échange d'objets entre robot et utilisateur, Huber *et al.* [Huber *et al.*, 2008] ont comparé deux profils de vitesse différents en termes de sécurité perçue et d'anthropomorphisme perçu. Kulić et Croft [Kulić et Croft, 2007] ont également comparé deux stratégies différentes d'approche d'un bras robotisé vers des utilisateurs et ont mesuré leur état affectif via des mesures physiologiques. Pour améliorer l'acceptabilité sociale du robot Frida aux côtés d'opérateurs, Zanchettin *et al.* [Zanchettin *et al.*, 2013] ont implémenté et évalué des mouvements biologiques sur ce robot.

Dans la littérature, des facteurs autres que l'apparence et les mouvements des robots ont également été étudiés et sont plus liés à leur comportement avec les utilisateurs. Nonaka *et al.* [Nonaka *et al.*, 2004] ont étudié la façon dont un robot humanoïde devait coordonner ses membres (ordre des mouvements du bras, de la tête et du torse) pour tendre un objet à l'utilisateur de manière acceptable. Inoue *et al.* [Inoue *et al.*, 2005; Inoue et Arai, 2008] ont évalué les préférences d'utilisateurs lorsqu'un robot mobile (à roues ou anthropomorphe) se déplaçait à leurs côtés (distance, posture). Woods *et al.* [Woods *et al.*, 2006a,b] ont testé différentes stratégies d'approche d'un robot mobile (direction d'approche, distance d'arrêt, vitesse) pour déterminer laquelle était la plus acceptable du point de vue des utilisateurs (confort, efficacité).

Enfin, il faut mentionner que toutes ces considérations sont essentiellement subjectives : elles dépendent largement de l'âge des participants, de leur sexe, de leur culture ou de leur expérience [de Graaf et Ben Allouch, 2013]. Kaplan [Kaplan, 2004] a fourni une interprétation très intéressante des différences culturelles actuelles entre occident et orient dans l'appréciation des robots au quotidien, au regard de la littérature et des mythes propres à chaque partie du globe. Nomura *et al.* [Nomura *et al.*, 2008] ont mené une étude complète entre la Corée, le Japon et les Etats-Unis : ils ont comparé plusieurs types de robots selon les idées pré-conçues que s'en faisaient les utilisateurs (degré d'autonomie supposé, capacité émotionnelle, rôle ou bénéfices pour la société) et ont interprété les différences selon chaque pays. Li *et al.* [Li *et al.*, 2010] ont étudié les différences culturelles entre la Corée, la Chine et l'Allemagne dans la perception de plusieurs apparences de robot (anthropomorphe, zoomorphe, fonctionnel) et de leur attribution à des tâches.

2.3 Synthèse générale

2.3.1 La collaboration homme-robot

Ce chapitre a permis de définir les notions importantes du sujet d'étude. Le terme de collaboration a été défini comme étant le processus de travailler ensemble dans l'objectif d'un but commun. La collaboration homme-robot désigne la collaboration entre un homme et un robot, généralement pour mettre à profit la complémentarité des compétences de chacun. Nous avons décrit l'ensemble des robots collaboratifs existant à ce jour dans les domaines de la robotique industrielle et de la robotique de service. Nous avons tenté de classifier les situations de collaboration homme-robot selon la division du travail et la distribution spatio-temporelle des acteurs.

Dans le cadre de la thèse, nous nous focalisons sur les robots-assistants du domaine industriel : nous ne nous intéressons pas aux situations où des robots viennent aider l'opérateur à porter des charges et à manipuler des outils (comme c'est le cas des cobots et des exosquelettes), mais plutôt à des situations où le robot est doté d'une certaine autonomie et partage le travail de manière collective avec l'opérateur (c'est le cas des robots-assistants). Ce type de robot permet une division du travail collective entre l'homme et le robot, ceux-ci possédant des rôles symétriques (même si les activités de chacun sont différentes et dépendent des compétences du robot). Nous considérons des situations de collaboration co-localisée : les espaces du robot et de l'opérateur sont confondus, jusqu'à autoriser le contact physique. L'opérateur et le robot peuvent travailler de façon synchrone ou asynchrone en fonction des situations. Enfin, nous nous restreignons aux situations où seulement un robot et un opérateur collaborent ensemble.

2.3.2 L'acceptabilité

Dans ce chapitre, nous avons également défini l'acceptabilité comme la manière qu'a un individu de se représenter une technologie et son utilisation future : l'étude de l'acceptabilité cherche à évaluer les probabilités d'appropriation de cette technologie, avec l'objectif de limiter les risques de rejet probables. Plusieurs modèles des composantes de l'acceptabilité ont été présentés. C'est le modèle de Nielsen [Nielsen, 1993] qui a été choisi pour décrire les composantes importantes de l'acceptabilité de la collaboration homme-robot. Ce modèle décompose l'acceptabilité d'un système en acceptabilité sociale et acceptabilité pratique, l'utilisabilité faisant partie de cette dernière. Différents facteurs peuvent influencer ces composantes du point de vue de la société (éthique, droit), de l'entreprise (coût, sécurité) ou de l'utilisateur (efficacité perçue, facilité d'utilisation, satisfaction). Ces facteurs ont été présentés dans le contexte de la collaboration homme-robot.

Dans le cadre de la thèse, nous nous focalisons essentiellement sur l'étude de l'acceptabilité du point de vue des opérateurs. Ainsi, c'est la notion d'utilisabilité qui nous intéresse le plus, en regroupant les composantes d'efficacité perçue, de facilité d'utilisation, de sécurité perçue et de satisfaction. Les composantes sociales (éthique, chômage) et industrielles (certification, sécurité intrinsèque des robots) ne sont pas mises de côté pour autant mais ne constituent pas le cœur de notre étude.

Chapitre 3

Les méthodologies d'évaluation

Ce chapitre a pour objectif de fournir un état de l'art sur les méthodologies utilisées dans la littérature pour étudier l'interaction homme-robot et évaluer l'acceptabilité des utilisateurs à communiquer et à collaborer avec des robots. Cet état de l'art se focalise sur deux points. D'une part, les différents types de tests utilisateurs sont présentés : les tests en situation réelle, les tests en situation enregistrée (images, vidéos) et ceux utilisant la réalité virtuelle. D'autre part, les différentes mesures de l'acceptabilité sont décrites. Elles comprennent l'auto-évaluation (par exemple avec des questionnaires), les mesures physiologiques (analyse des signaux émotifs des utilisateurs) et les mesures comportementales (analyse du comportement des utilisateurs).

3.1 Les tests utilisateurs

L'étude de l'acceptabilité de la collaboration homme-robot requiert toujours de mener des tests utilisateurs au cours desquels des personnes sont confrontées à des robots. Ces tests sont parfois menés en environnement réel, avec une situation physique et un robot physique. Ils peuvent aussi s'effectuer en proposant aux utilisateurs des situations enregistrées : images, vidéos. Enfin, la réalité virtuelle a aussi été utilisée dans un nombre restreint d'études.

3.1.1 Les tests en situation réelle

Les tests en situation réelle sont généralement utilisés lorsqu'une interaction forte est requise entre l'utilisateur et le robot ou lorsque l'on veut se rapprocher au plus près de la configuration réelle (voir Figure 3.1). Ces tests ont par exemple été menés pour valider le fonctionnement de plusieurs briques technologiques d'une plateforme spécifique de collaboration homme-robot : les plateformes *rob@work* [Helms *et al.*, 2002] et *PowerMate* [Schraft *et al.*, 2005], ou encore les plateformes *JAST* [Huber *et al.*, 2008] et *JAHIR* [Lenz, 2011]. Ces plateformes proviennent souvent du domaine industriel et répondent à des besoins spécifiques.

Des tests en situation réelle ont également été menés pour évaluer des éléments subtils de l'interaction homme-robot, telles que la sécurité perçue d'un robot [Karwowski et Rahimi, 1991] et les réactions physiologiques d'utilisateurs face à des robots [Kulić et Croft, 2007; Zanchettin *et al.*, 2013].

L'inconvénient de ces tests en situation réelle concerne leur mise en place, qui peut être longue et coûteuse. En effet, les aspects techniques relatifs au design de la plateforme ou à la programmation du robot prennent du temps et des contraintes technologiques peuvent parfois empêcher l'implémentation de certaines fonctionnalités utiles pour la collaboration homme-robot. Le prix

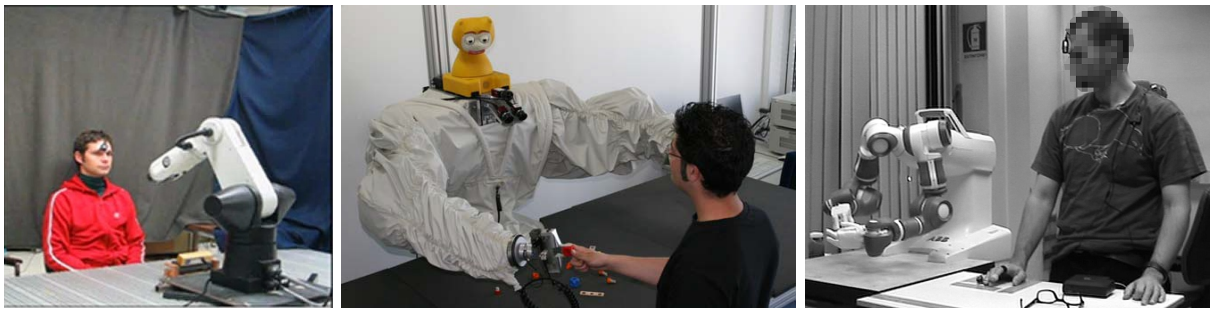


FIGURE 3.1 – Des exemples de tests menés en situation réelle [Kulić et Croft, 2007; Huber *et al.*, 2008; Zanchettin *et al.*, 2013]

de certains dispositifs est également prohibitif, surtout si l'on considère qu'ils ne seront finalement utilisés que pour un projet ou une étude en particulier. De plus, les tests en situation réelle se focalisent souvent sur des plateformes spécifiques et il n'est pas toujours possible de modifier un grand nombre de paramètres (robots différents, comportements différents) : la diversité des configurations de test à présenter aux utilisateurs est restreinte. Enfin, les tests en situation réelle sont également tenus de respecter certaines normes de sécurité, qui peuvent parfois être contraignantes lorsque l'on souhaite étudier de nouvelles configurations d'interaction.

3.1.2 Les tests en situation enregistrée

Une méthode alternative aux situations réelles consiste à présenter aux utilisateurs des situations sous forme enregistrée, à l'aide d'images ou de vidéos. Woods *et al.* [Woods *et al.*, 2006a,b] ont présenté les avantages suivants liés à l'utilisation de séquences vidéos :

- Recueillir plus d'impressions d'utilisateurs plus rapidement ;
- Modifier et améliorer continuellement les séquences ;
- Faire passer plusieurs tests simultanément ;
- Prototyper des situations et des hypothèses ;
- Standardiser les tests (reproductibilité).

Ce type de tests est souvent utilisé pour évaluer certains facteurs liés au robot. Par exemple, dans leurs études sur le design des têtes de robots, DiSalvo *et al.* [DiSalvo *et al.*, 2002] et Goetz *et al.* [Goetz *et al.*, 2003] ont présenté à des utilisateurs un nombre important d'images de têtes de robots pour recueillir leurs impressions, tandis que Powers et Kiesler [Powers et Kiesler, 2006] ont utilisé des vidéos pour simuler une discussion entre un utilisateur et une tête robotisée. Walters *et al.* [Walters *et al.*, 2007] ont également utilisé des vidéos pour proposer des scénarios d'interaction entre des utilisateurs et des robots domestiques d'apparences différentes (mécanique, basique, anthropomorphe) afin d'étudier la vallée dérangeante de Mori [Mori, 1970] (voir Figure 3.2).

Dans leurs études sur les mouvements de robots, Shibata et Inooka [Shibata et Inooka, 1998] et Kupferberg *et al.* [Kupferberg *et al.*, 2011] ont utilisé des vidéos pour garantir la reproductibilité des conditions (profils de vitesse) et garantir la pertinence des résultats (impressions des utilisateurs). D'autres études ont utilisé des images et des vidéos plutôt pour la possibilité de les modifier facilement. Par exemple, Hanson [Hanson, 2006] et MacDorman [MacDorman, 2006] ont utilisé des images pour fabriquer des morphings entre un robot et un humain (voir Figure 3.2) et reproduire ou inverser la vallée dérangeante.

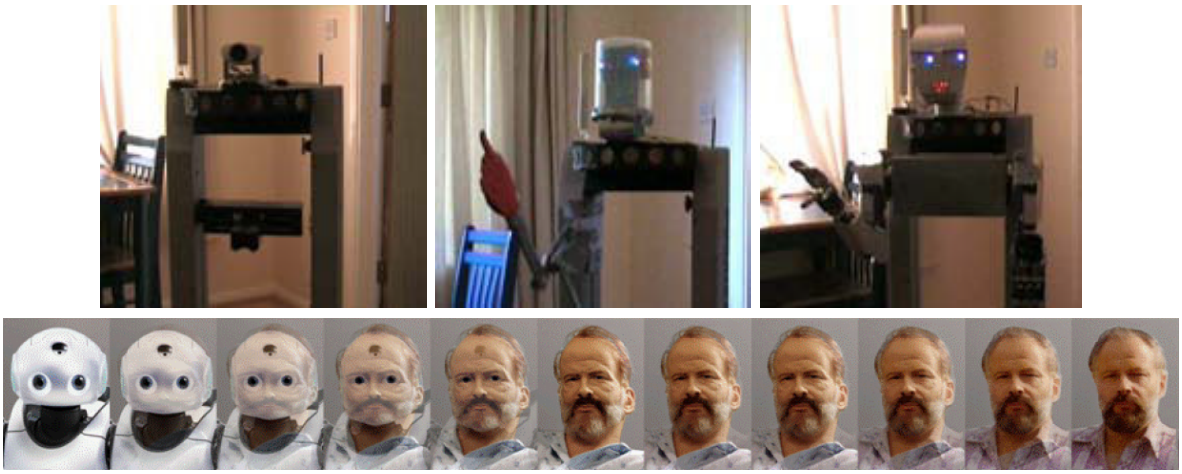


FIGURE 3.2 – Des exemples de robots proposés à l'aide de vidéos [Walters *et al.*, 2007] (en haut) ou d'images [Hanson, 2006] (en bas)

La pertinence d'utiliser des vidéos pour évaluer l'interaction homme-robot a été mise en avant par Woods *et al.* [Woods *et al.*, 2006a,b], avec l'étude de l'acceptabilité de l'approche d'un robot mobile à proximité d'une personne (direction d'approche, vitesse, distance d'arrêt). Les utilisateurs observaient le comportement du robot en situation réelle et en situation enregistrée et les impressions des utilisateurs étaient recueillies via des questionnaires. De bonnes corrélations ont été trouvées pour chaque condition entre la situation réelle et la situation enregistrée, ce qui a poussé d'autres études à se baser sur des séquences vidéos [Syrdal *et al.*, 2007; Walters *et al.*, 2007].

3.1.3 Les tests utilisant la réalité virtuelle

Certains tests ont utilisé la réalité virtuelle pour proposer aux utilisateurs des scénarios d'interaction avec des robots virtuels et des situations virtuelles. Avant d'exposer les intérêts et les enjeux de ce type de tests, nous proposons une brève introduction au domaine de la réalité virtuelle.

3.1.3.1 Introduction à la réalité virtuelle

Plutôt que de donner une définition globale du domaine de la réalité virtuelle, Fuchs *et al.* [Fuchs *et al.*, 2006b, p. 5] ont proposé de définir la réalité virtuelle par sa finalité :

> La finalité de la réalité virtuelle est de permettre à une personne (ou à plusieurs) une activité sensori-motrice et cognitive dans un monde artificiel, créé numériquement, qui peut être imaginaire, symbolique ou une simulation de certains aspects du monde réel.

L'intérêt de la réalité virtuelle par rapport à des applications informatiques basiques est de pouvoir placer l'utilisateur au centre de ces applications. Les maîtres mots de la réalité virtuelle sont ainsi l'**immersion** et l'**interaction** : l'utilisateur doit pouvoir évoluer dans un environnement virtuel et pouvoir interagir avec des éléments de cet environnement de manière pseudo-naturelle, aux niveaux à la fois sensori-moteur, cognitif et fonctionnel.

Afin de garantir l'immersion et l'interaction de l'utilisateur dans l'environnement virtuel, un certain nombre d'interfaces sont utilisées. Fuchs *et al.* [Fuchs *et al.*, 2006c, p. 21] discernent les interfaces sensorielles (qui restituent des stimuli sensoriels via les sens de l'utilisateur), les interfaces motrices (qui transmettent à l'ordinateur les réponses motrices de l'utilisateur) et les interfaces sensori-motrices (qui permettent un échange dans les deux sens).

Les interfaces visuelles sont un exemple d'interface sensorielle : elles permettent de restituer des images de l'environnement virtuel en entourant l'utilisateur d'écrans (dispositifs de type CAVE, voir Figure 3.3) ou alors en lui faisant porter un visio-casque. La stéréoscopie permet à l'utilisateur de percevoir cet environnement en relief. Ces interfaces visuelles peuvent être complétées par des interfaces auditives (sons), haptiques (toucher) ou encore olfactives (odorat).

Les interfaces motrices comprennent les interfaces qui permettent de localiser l'utilisateur dans l'environnement et de détecter ses mouvements. On utilise pour cela des systèmes de capture de mouvements à l'aide de caméras optiques, infrarouges ou de capteurs inertiels. L'utilisateur peut ainsi bouger la tête pour observer différentes parties de l'environnement et manipuler des objets virtuels à l'aide de ses mains. L'utilisateur peut également être amené à naviguer dans l'environnement virtuel. Les systèmes à retour d'effort constituent un exemple d'interface sensori-motrice, en permettant aux utilisateurs d'effectuer des mouvements dans l'environnement virtuel et de ressentir la réaction du système (présence de certains objets virtuels, contraintes mécaniques).

FIGURE 3.3 – Un utilisateur dans un système de type CAVE (Christie, à gauche) et un utilisateur portant un casque de réalité virtuelle (Oculus Rift, à droite)

Les secteurs d'applications de la réalité virtuelle sont multiples (voir Figure 3.4) : sciences, psychothérapie, médecine, environnement, industrie, architecture... Dans beaucoup de cas, ces applications regroupent des fonctions similaires, qui ont été classifiées par Fuchs *et al.* [Fuchs *et al.*, 2006a, p. 20] selon les verbes suivants :

- Comprendre : la réalité virtuelle permet de représenter des phénomènes complexes à l'aide d'un monde symbolique dans lequel l'utilisateur peut évoluer et interagir afin de mieux le comprendre. C'est par exemple le cas pour la visualisation et la manipulation de molécules biologiques complexes ou la compréhension de la diffusion de la chaleur dans une pièce ;
- Concevoir : la réalité virtuelle est dorénavant souvent utilisée pour visualiser et manipuler des modèles numériques de produits afin d'améliorer leur conception avant leur production réelle. Plutôt que d'utiliser des maquettes physiques, ces approches permettent un gain de temps et d'argent, comme par exemple dans l'industrie automobile. Des tests utilisateurs permettent de plus de récolter des impressions sur le produit futur ;

- Apprendre : la réalité virtuelle peut immerger des utilisateurs dans un environnement virtuel pour les former sur le fonctionnement d'un système complexe dont la formation, en situation réelle, serait dangereuse, coûteuse ou d'accès restreint. Ces formations en environnement virtuel sont utilisées par exemple dans les domaines de l'aéronautique (pilotage d'avion), du nucléaire (inspection des centrales) ou militaires ;
- Contrôler : la réalité virtuelle peut servir pour des applications de téléopération, dans lesquelles un utilisateur contrôle et interagit à distance avec un système complexe (robot mobile, opération chirurgicale). On peut également y ajouter les applications de téléprésence, dans lesquelles un utilisateur peut communiquer à distance avec d'autres personnes (gestion de projet) ;
- Distraire : la réalité virtuelle peut être utilisée à des fins de distraction, généralement dans des mondes imaginaires, à travers des performances artistiques ou encore les jeux vidéos.

FIGURE 3.4 – Des exemples d'applications de la réalité virtuelle : un simulateur de conduite (MINES ParisTech), une formation à la technique de projection d'enduit de façade de bâtiment (Clarté) et une exploration de dynamique des fluides (Limsi).

La réalité virtuelle est donc focalisée à la fois sur des applications techniques (conception d'un produit, compréhension d'un phénomène, contrôle d'un dispositif) et humaines (formation, divertissement). Puisque les utilisateurs sont toujours au centre des dispositifs de réalité virtuelle, celle-ci permet aussi de mieux comprendre le comportement humain. C'est par exemple le cas en psychothérapie, où la réalité virtuelle est utilisée pour le traitement des phobies (peur de parler en public, peur du vide, peur des araignées...) ou pour la réhabilitation médicale (entraînement aux tâches de la vie quotidienne). Les tests utilisateurs ont ainsi un rôle important dans la réalité virtuelle, à la fois pour étudier et modifier le comportement des utilisateurs : ces tests permettent de récolter des impressions sur des situations et sur l'utilisabilité d'un système en particulier. C'est dans ce cadre que la réalité virtuelle peut apporter un intérêt dans l'évaluation de l'acceptabilité de la collaboration homme-robot.

3.1.3.2 La réalité virtuelle pour l'étude de l'acceptabilité

Bien que les séquences d'images et de vidéos permettent de tester plusieurs situations rapidement, leur gros inconvénient est qu'elles ne permettent pas d'interaction entre l'utilisateur et le robot. La réalité virtuelle permet de concilier ces deux aspects : elle peut proposer des situations proches de la réalité et modifier un grand nombre de paramètres, tout en garantissant à l'utilisateur une immersion et une interaction fortes dans l'environnement.

La réalité virtuelle a encore été assez peu utilisée dans le domaine de la collaboration homme-robot. DeSantis *et al.* [De Santis *et al.*, 2008] l'ont utilisée pour évaluer la faisabilité et l'utilisabi-

lité d'un fauteuil roulant muni d'un bras robotisé : les utilisateurs étaient assis dans un fauteuil physique et effectuaient des tâches de manipulation en contrôlant un bras robotisé virtuel (voir Figure 3.5). La réalité virtuelle a également été utilisée pour programmer facilement des robots de manière naturelle en environnement virtuel, sans contact physique avec le robot et donc sans danger (système IVRE [1], voir Figure 3.5).

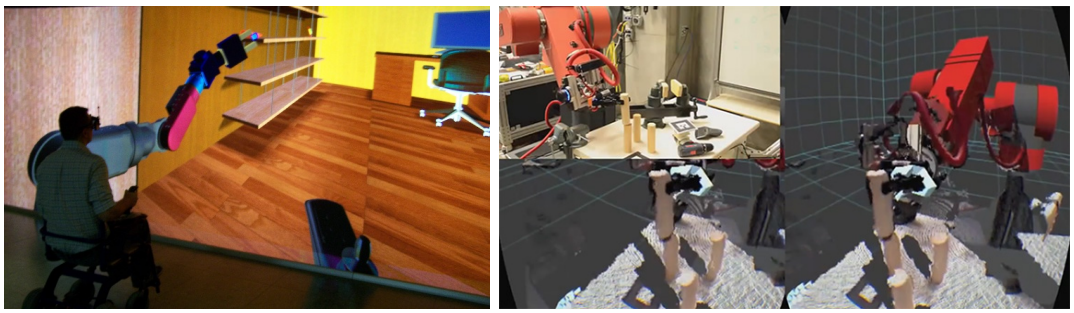


FIGURE 3.5 – Un test d'utilisabilité de bras robotisé en environnement virtuel [De Santis *et al.*, 2008] et la programmation d'un robot en environnement virtuel (système IVRE)

Nonaka *et al.* [Nonaka *et al.*, 2004] et Inoue *et al.* [Inoue *et al.*, 2005; Inoue et Arai, 2008] se sont penchés sur l'étude de certains attributs du robot en environnement virtuel. Ils ont utilisé la réalité virtuelle pour présenter à des utilisateurs plusieurs modèles virtuels de robots anthropomorphes ou mobiles (dans des dispositifs de type CAVE ou via des visio-casques, voir Figure 3.6) et ont recueilli leurs impressions vis-à-vis de la forme du robot, de sa démarche, de ses mouvements ou de la distance perçue comme sécurisante. Cependant, dans ces études, les utilisateurs étaient principalement passifs : ils ne faisaient qu'observer les robots et n'interagissaient pas avec eux.

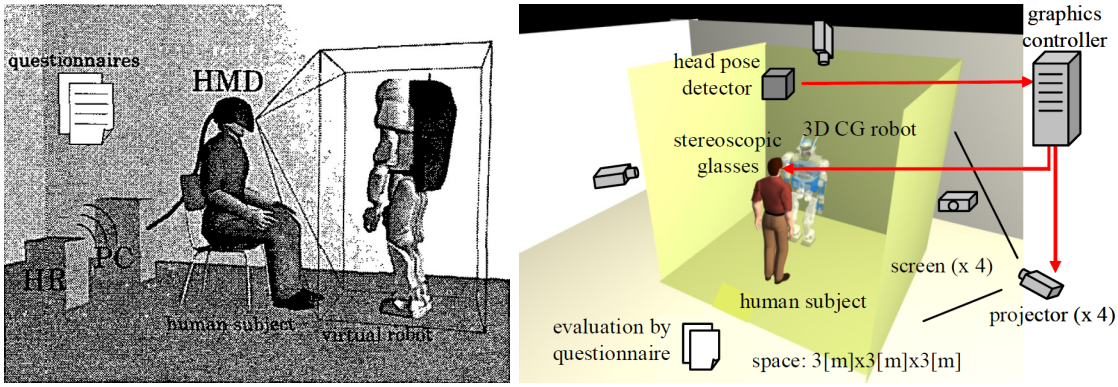


FIGURE 3.6 – Des études de certains attributs de robots en environnement virtuel [Nonaka *et al.*, 2004; Inoue *et al.*, 2005]

3.1.3.3 La pertinence de la réalité virtuelle

Même si l'utilisation de la réalité virtuelle apporte des avantages par rapport à des situations réelles (gain de temps, gains financiers, simulation de situations complexes ou dangereuses), elle

1. http://cirl.lcsr.jhu.edu/research/human-machine-collaborative-systems/ivre/

amène également des contraintes, dont Fuchs *et al.* [Fuchs *et al.*, 2006b, p. 9] en font ressortir deux majeures :

- La latence ;
- Les incohérences sensori-motrices.

La latence concerne le décalage temporel entre les actions de l'utilisateur et la perception des conséquences de ces actions sur l'environnement virtuel : il est important de savoir quelles sont les valeurs des temps de latence supportables par l'homme pour que l'immersion et l'interaction dans l'environnement virtuel soient effectifs.

Les incohérences sensorielles représentent les biais entre les stimuli sensoriels artificiels et ceux reçus dans le monde réel. Ces incohérences peuvent être liées aux interfaces visuelles : résolution d'écran moins fine que la réalité, champ de vision restreint (taille des écrans, contraintes liées aux lunettes stéréoscopiques), fatigue visuelle (liée à la vision stéréoscopique). Ces incohérences sensorielles peuvent aussi être d'ordre sonore (simulation du son, spatialisation) ou haptique (il est difficile de pouvoir toucher concrètement des objets virtuels). Les incohérences motrices représentent les biais entre les actions effectuées dans le monde virtuel et celles réalisées naturellement dans le monde réel. En effet, même si les technologies actuelles permettent une interaction de plus en plus naturelle dans l'environnement virtuel, les actions des utilisateurs sont souvent simplifiées ou remplacées par des métaphores. C'est par exemple le cas de la préhension d'objets (déclenchée par un bouton ou par proximité des mains d'un utilisateur) et de la marche (commandée par un joystick ou par des mouvements pseudo-naturels des pieds).

L'ensemble de ces incohérences sensori-motrices réduit l'immersion et l'interaction des utilisateurs et peut perturber leur comportement dans l'environnement virtuel. Les résultats tirés d'études utilisant la réalité virtuelle sont donc toujours à nuancer et à confronter aux résultats issus de tests effectués en situation réelle. Il s'agit alors de déterminer si la réalité virtuelle peut faire ressortir des résultats représentatifs et pertinents vis-à-vis de la situation réelle. Dans les différents domaines d'application utilisant la réalité virtuelle, peu d'études ont été menées avec des situations réelles et virtuelles identiques en parallèle pour évaluer la pertinence des tests virtuels.

Dans le contexte de la collaboration homme-robot et de l'étude de l'acceptabilité, la pertinence de l'utilisation de la réalité virtuelle est d'une grande importance. Il s'agit de recueillir des impressions subjectives d'utilisateurs ou d'opérateurs vis-à-vis de robots virtuels : on peut se demander si les utilisateurs se comportent de la même façon face à des robots virtuels et face à des robots réels, si leurs impressions de sécurité sont semblables dans chaque situation et s'ils acceptent de collaborer avec ces robots de manière similaire.

Inoue *et al.* [Inoue *et al.*, 2005] se sont focalisés sur la comparaison de situations réelles et leurs équivalents virtuels en utilisant la réalité virtuelle. Des impressions d'utilisateurs ont été recueillies lorsqu'un robot mobile leur tendait un objet ou se déplaçait près d'eux, à la fois en situation réelle et en situation virtuelle. Inoue *et al.* ont déterminé que l'état psychologique des utilisateurs était similaire dans les deux situations. Cependant, les utilisateurs étaient globalement passifs en présence du robot (aucune interaction n'était demandée) et les impressions n'étaient recueillies que par des questionnaires sur les mouvements du robot.

Ces limites invitent à approfondir la question de la pertinence de l'utilisation de la réalité virtuelle, spécialement lorsqu'une forte interaction est demandée entre l'opérateur et le robot (collaboration), que d'autres critères d'acceptabilité sont étudiés (sécurité perçue, utilisabilité) et que des moyens d'évaluation additionnels aux questionnaires sont utilisés (mesures physiologiques).

3.2 L'évaluation de l'acceptabilité

Une fois des tests utilisateurs mis en place, il est nécessaire de déterminer quels sont les critères à évaluer au cours de l'interaction et par quels moyens les évaluer. Lorsque l'on considère l'efficacité d'un système, les critères à mesurer sont souvent simples : temps total de la tâche, précision des mouvements, nombre d'erreurs (critères quantitatifs). Mais dans le cas de l'acceptabilité et notamment de l'utilisabilité, les critères à évaluer sont essentiellement subjectifs. La principale difficulté de l'évaluation réside donc dans le fait de mesurer des critères subjectifs et d'en tirer une interprétation objective.

Kidd et Breazeal [Kidd et Breazeal, 2005] ont divisé les types d'évaluation de l'interaction homme-robot en trois catégories : l'auto-évaluation (*self-report measures*), les mesures physiologiques (*physiological measures*) et les mesures comportementales (*behavioral measures*).

3.2.1 L'auto-évaluation

Les mesures les plus directes pour évaluer l'interaction homme-robot sont les questionnaires : après une tâche d'interaction avec un robot, on demande aux utilisateurs de noter sur plusieurs échelles leurs ressentis et leurs impressions vis-à-vis de l'interaction avec le robot. Par exemple, Shibata et Inooka [Shibata et Inooka, 1998] ont utilisé des questionnaires pour évaluer les mouvements de va-et-vient d'un robot industriel et ont utilisé des échelles d'Osgood à 7 points sur les notions suivantes : agréable/désagréable, doux/maladroit, rapide/lent, prudent/négligent, intéressant/ennuyant, compétent/incompétent, humain/mécanique (voir Figure 3.7). Les résultats leur ont notamment permis de déterminer quel profil de vitesse était perçu comme le plus anthropomorphe.

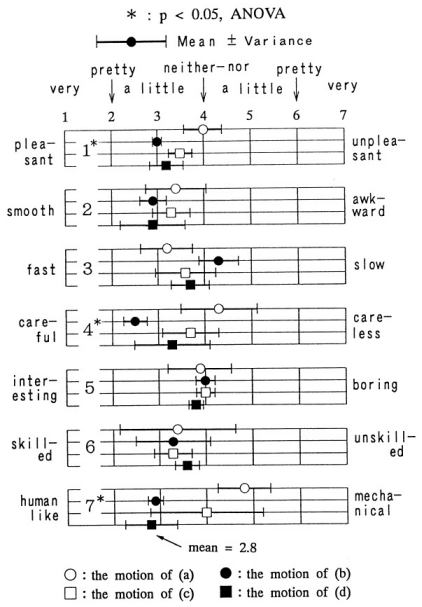


FIGURE 3.7 – Les résultats d'un questionnaire sur les profils de vitesse d'un bras robotisé [Shibata et Inooka, 1998]

Plusieurs questionnaires tendent à servir de références pour évaluer l'interaction homme-robot de manière standardisée et pour garantir une meilleure comparaison entre études. Le

questionnaire NARS (pour *Negative Attitudes toward Robots Scale*) en fait partie (voir Figure 3.8) : il met en place une échelle pour évaluer les attitudes des personnes vis-à-vis de la communication avec des robots dans la vie de tous les jours. Cette échelle a notamment été utilisée par Nomura *et al.* [Nomura *et al.*, 2004] pour mesurer l'anxiété des personnes vis-à-vis des robots. Bartneck *et al.* [Bartneck *et al.*, 2009] ont également proposé leur propre série de questionnaires (*Godspeed questionnaires*), destinés à être utilisées par la communauté pour mesurer comment des utilisateurs perçoivent les robots. Les questions sont divisées en cinq grandes catégories :

- L'anthropomorphisme (voir Figure 3.9) ;
- L'animéité (caractère vivant) ;
- La sympathie ;
- L'intelligence perçue ;
- La sécurité perçue.

No.	Questionnaire Items
1	I would feel uneasy if robots really had emotions.
2	Something bad might happen if robots developed into living beings.
3	I would feel relaxed talking with robots.*
4	I would feel uneasy if I was given a job where I had to use robots.
5	If robots had emotions, I would be able to make friends with them.*
6	I feel comforted being with robots that have emotions.*
7	The word "robot" means nothing to me.
8	I would feel nervous operating a robot in front of other people.
9	I would hate the idea that robots or artificial intelligences were making judgments about things.
10	I would feel very nervous just standing in front of a robot.
11	I feel that if I depend on robots too much, something bad might happen.
12	I would feel paranoid talking with a robot.
13	I am concerned that robots would be a bad influence on children.
14	I feel that the future society will be dominated by robots.

(*inverse item)

FIGURE 3.8 – Le questionnaire NARS (en anglais) pour évaluer les attitudes négatives à l'égard des robots (questions sur cinq points) [Nomura *et al.*, 2004]

GODSPEED I: ANTHROPOMORPHISM

Please rate your impression of the robot on these scales:

以下のスケールに基づいてこのロボットの印象を評価してください。

Fake 偽物のような	1	2	3	4	5	Natural 自然な
Machinelike 機械的	1	2	3	4	5	Humanlike 人間的
Unconscious 意識を持たない	1	2	3	4	5	Conscious 意識を持っている
Artificial 人工的	1	2	3	4	5	Lifelike 生物的
Moving rigidly ぎこちない動き	1	2	3	4	5	Moving elegantly洗練された動き

FIGURE 3.9 – L'un des cinq *Godspeed questionnaires* pour évaluer l'anthropomorphisme [Bartneck *et al.*, 2009]

Yagoda et Gillan [Yagoda et Gillan, 2012] se sont plus concentrés sur la notion de confiance dans l'interaction homme-robot (notamment dans des applications de contrôle de drone) et ont développé un questionnaire pour l'évaluer, basé sur des échelles de Likert à 7 points et centré

sur les notions de fonctionnalité, de performance et de sémantique.

Broadbent *et al.* [Broadbent *et al.*, 2011] ont utilisé une manière originale pour déterminer les idées préconçues des utilisateurs à propos des robots avant leur interaction avec des robots réels. Ils ont demandé aux utilisateurs de dessiner l'image qu'ils se faisaient d'un robot de service de santé (voir Figure 3.10). Les dessins ont ensuite été analysés en fonction de l'apparence mécanique ou humaine du robot et de ses dimensions (petit, grand) et ont servi à l'interprétation des réactions des utilisateurs lors de l'interaction avec un robot de service réel.

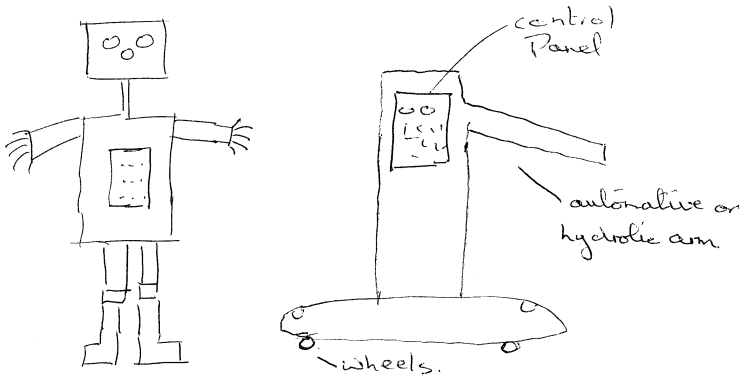


FIGURE 3.10 – Des exemples de dessins de deux utilisateurs imaginant un robot de service [Broadbent *et al.*, 2011]

Les inconvénients des questionnaires sont les biais liés à la relation interviewé/interviewer : les réponses peuvent être influencées par la manière de poser la question et l'utilisateur peut également répondre de façon à se mettre en valeur.

3.2.2 Les mesures physiologiques

Dans l'interaction homme-robot, afin de compléter des résultats issus de questionnaires, des mesures physiologiques sont parfois utilisées pour estimer l'état affectif des utilisateurs face à des robots : état de stress, de peur, de relaxation. L'utilisation de mesures physiologiques a généralement un double objectif.

D'une part, il s'agit d'estimer l'état affectif des utilisateurs pour déterminer si l'interaction se déroule correctement et déceler des différences entre plusieurs situations.

D'autre part, il s'agit d'utiliser l'estimation de cet état affectif comme entrée pour adapter le comportement du robot et le rendre plus acceptable. Sarkar [Sarkar, 2002] a notamment proposé d'estimer l'état affectif des utilisateurs en temps réel lors de l'interaction avec un robot, à l'aide de multiples mesures (rythme cardiaque, réponse électrodermale, tension musculaire, respiration), afin de déterminer quelles actions du robot engendraient des réponses émotionnelles et d'adapter le comportement du robot en conséquence. Rani *et al.* [Rani *et al.*, 2002] ont repris ce principe et ont exposé une méthode détaillée d'analyse du rythme cardiaque pour estimer le stress des utilisateurs lors de l'interaction avec des robots.

Dans notre cadre d'étude, nous considérons l'utilisation de mesures physiologiques comme un moyen d'évaluation de l'acceptabilité. Les aspects liés à l'adaptation du comportement du robot ne sont donc pas traités dans la suite.

3.2.2.1 Les différents types de mesures physiologiques dans l'interaction homme-robot

Afin de mesurer différents états de concentration et d'attention, on peut mesurer l'activité cérébrale des utilisateurs. L'électro-encéphalographie (EEG) permet de mesurer l'activité électrique du cerveau à l'aide d'électrodes au niveau du cuir chevelu. Une autre technique, l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), permet de localiser et visualiser les zones du cerveau qui sont actives lors d'une tâche (voir Figure 3.11) : cette technique mesure les variations du flux sanguin (réponse hémodynamique) dans les zones du cerveau. Dans le domaine de l'interaction homme-robot, Chaminade *et al.* [Chaminade *et al.*, 2010] ont utilisé l'IRMf pour étudier les réponses de personnes à différentes émotions produites par un robot. Canning et Scheutz [Canning et Scheutz, 2013] ont proposé d'utiliser une technique inspirée de l'IRMf, moins invasive et plus portable, pour étudier l'interaction homme-robot (voir Figure 3.11) : l'imagerie spectroscopique proche infrarouge fonctionnelle (ISPIf). Elle a notamment été utilisée par Strait et Scheutz [Strait et Scheutz, 2014] pour étudier la vallée dérangeante et tester les réponses de personnes à différentes images de robots.

FIGURE 3.11 – Une image obtenue par IRMf pour étudier la réaction aux émotions d'un robot [Chaminade *et al.*, 2010] (à gauche) et un utilisateur portant un système d'ISPIf [Canning et Scheutz, 2013] (à droite).

On peut aussi choisir de mesurer l'activité électrique des muscles des utilisateurs, à l'aide de l'électro-myographie (EMG). En plaçant des électrodes sur la peau des utilisateurs, l'EMG permet de détecter si des muscles spécifiques sont contractés ou relâchés (voir Figure 3.12). Pour l'interaction homme-robot, l'EMG a été notamment utilisée pour mesurer la contraction des muscles corrugateurs des sourcils [Kulić et Croft, 2007; Zanchettin *et al.*, 2013], afin de déceler si les utilisateurs plissaient le front ou fronçaient les sourcils et déterminer s'ils étaient frustrés et stressés face à différents types de mouvements de robots.

Plutôt que de mesurer l'activité de muscles divers, on peut mesurer celle du cœur des utilisateurs : c'est le domaine de l'électro-cardiographie (ECG). A l'aide d'électrodes à poser sur le torse au niveau du cœur, on obtient des électro-cardiogrammes qui représentent l'activité électrique du cœur (série de plusieurs pics). L'analyse de ces électro-cardiogrammes permet d'obtenir de multiples informations telles que la forme des signaux électriques (notamment les pics) et leur fréquence, dont le rythme cardiaque peut être déduit. Plutôt que d'utiliser des systèmes d'ECG complexes, on peut aussi simplement mesurer le rythme cardiaque en détectant les contractions de la cage thoracique (à l'aide d'une ceinture) ou en mesurant le pouls à l'aide d'un photo-pléthysmographe (mesure des variations d'absorption de la lumière au niveau des doigts).

Pour l'interaction homme-robot, le rythme cardiaque des utilisateurs permet de déterminer

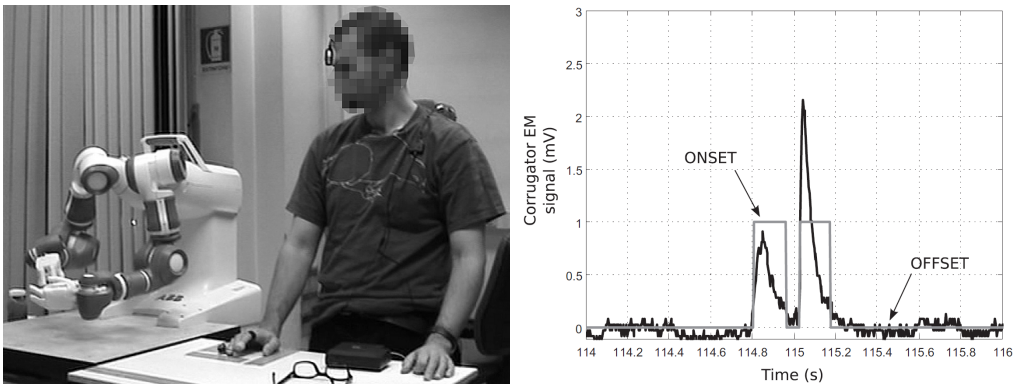


FIGURE 3.12 – Une expérimentation utilisant l'EMG (muscles des sourcils) et un électromyogramme associé [Zanchettin *et al.*, 2013]. Les *onsets* correspondent à des contractions et les *offsets* à des relâchements.

l'intensité de la tâche qu'ils sont en train d'effectuer. Le rythme cardiaque est bas au repos et augmente lors d'activités physiques. L'analyse du rythme cardiaque est importante notamment dans les systèmes d'assistance à la charge où les robots collaborent avec les opérateurs pour les soulager d'une tâche pénible et fatigante : la collaboration est sensée diminuer leur rythme cardiaque. L'accélération du rythme cardiaque peut également révéler une situation de stress et de panique. Nonaka *et al.* [Nonaka *et al.*, 2004] ont notamment tenté de corréler le rythme cardiaque des utilisateurs avec leur impression de sécurité et leurs réponses à des questionnaires, face aux mouvements d'un robot humanoïde.

Enfin, l'activité électro-dermale (EDA) des utilisateurs est un bon indicateur de leur état émotionnel. L'activité électro-dermale correspond au niveau de sudation (transpiration) des utilisateurs, mesuré grâce à la conductance de la peau. Des électrodes sont placées sur la peau (sur deux doigts par exemple) et un courant est mesuré entre ces électrodes : plus la sudation est importante (plus les glandes sécrètent d'humidité), plus la conductance est élevée. En général, une hausse de la conductance signifie une augmentation du stress.

L'activité électro-dermale permet d'obtenir deux types d'information [Dawson *et al.*, 2000] : le signal tonique et le signal phasique. Le signal tonique correspond au niveau moyen de conductance (*Skin Conductance Level*, SCL) tandis que le signal phasique correspond à sa dérivée et permet de repérer des pics dans la conductance (*Skin Conductance Response*, SCR). D'une part, le SCL permet d'analyser le niveau moyen de stress au cours de l'interaction : plus le SCL est élevé, plus l'activité est stressante pour l'utilisateur. D'autre part, il est normal que des pics surviennent dans la conductance de la peau. Au repos, chaque personne produit des pics spontanément à une fréquence d'environ 2 ou 3 par minute : cette fréquence augmente lors d'activités physiques ou de situations stressantes. Ces pics peuvent également intervenir juste après des stimuli discrets : l'apparition d'un pic de conductance (SCR) juste après un événement spécifique représente la réaction de la personne à cet événement. L'analyse des pics, avec leur amplitude et leur durée, permet de déterminer l'importance de la réaction. Dans l'interaction homme-robot, ces pics de conductance peuvent être liés à des mouvements et des comportements perturbants de la part du robot.

La conductance de la peau a notamment été utilisée par Kulić et Croft [Kulić et Croft, 2007] pour étudier les réactions d'utilisateurs face à différents mouvements d'approche d'un robot (voir Figure 3.13).

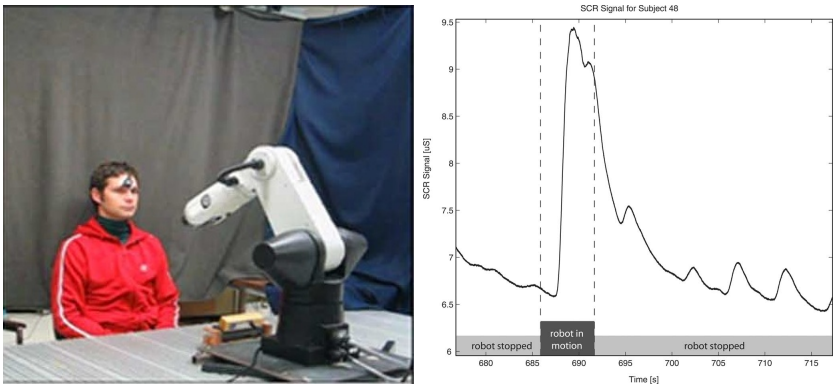


FIGURE 3.13 – Une expérimentation utilisant l'activité électro-dermale et une mesure de conductance associée [Kulić et Croft, 2007]. Un pic de conductance apparaît lors de l'observation du mouvement du robot.

Une manière un peu plus détournée d'analyser l'activité neuro-physiologique des utilisateurs a été mise en avant par Kilner *et al.* [Kilner *et al.*, 2003] avec le phénomène d'interférence motrice. Ce phénomène, lié aux neurones miroirs, implique que l'observation de certains mouvements chez une autre personne catalyse l'exécution de ces mêmes mouvements (résonance motrice). A l'inverse, l'observation de mouvements opposés inhibe l'exécution des mouvements initiaux (interférence motrice). Kilner *et al.* ont tenté de reproduire ce phénomène lors de mouvements de bras horizontaux ou verticaux : l'observation d'une personne effectuant des mouvements transverses devrait interférer sur nos propres mouvements. Le phénomène d'interférence motrice a été significatif lorsque les sujets observaient une personne humaine, mais pas un robot. Des études supplémentaires ont été menées pour déterminer quels étaient les facteurs influents dans cette différence : impact de l'apparence (robot humanoïde, humain) [Oztop *et al.*, 2004], impact de la nature des mouvements (biologiques ou mécaniques) [Chaminade *et al.*, 2005; Kilner *et al.*, 2007; Kupferberg *et al.*, 2011]. Il semblerait que la nature des mouvements ait un rôle majeur dans l'apparition du phénomène d'interférence motrice. Oztop *et al.* [Oztop *et al.*, 2004] ont proposé que le degré d'intensité du phénomène d'interférence motrice puisse être utilisé comme un indicateur du niveau d'anthropomorphisme du robot. Même si ces études mettent en valeur l'influence de l'apparence et des mouvements des robots, elles ont surtout un intérêt en sciences neuronales et ne peuvent être appliquées que de manière restreinte au domaine de l'interaction homme-robot.

3.2.2.2 L'interprétation des signaux

L'interprétation des mesures physiologiques peut se faire à plusieurs niveaux. Elle peut se contenter d'utiliser les données brutes des signaux (bas niveau) ou alors essayer d'identifier et de catégoriser les états émotifs de l'utilisateur (haut niveau).

Lorsqu'il s'agit de comparer les comportements d'un utilisateur entre plusieurs situations, l'analyse des données brutes et de leurs variations entre ces différentes situations peut suffire pour l'interprétation. Par exemple, une hausse de la conductance de la peau ou du rythme cardiaque peut signifier une activité plus stressante ou plus intense. Pour des études avec plusieurs utilisateurs, étant donné que les mesures physiologiques sont dépendantes de la physionomie de chacun, il est nécessaire de normaliser les données brutes de chaque utilisateur entre une valeur minimale et une valeur maximale (qui dépendent de l'utilisateur). Ces valeurs sont généralement

générées sur la totalité des tests d'un utilisateur, ou alors au cours d'une période de repos (valeur minimale) et d'une période d'activité intense (valeur maximale). On peut ainsi analyser les données brutes de l'ensemble des utilisateurs et les comparer entre plusieurs situations d'interaction (ou entre utilisateurs).

Dans la littérature sur l'interaction homme-robot, plusieurs études ont analysé leurs résultats en comparant les données brutes de mesures physiologiques. Broadbent *et al.* [Broadbent *et al.*, 2011] ont mesuré les variations de pression sanguine chez des utilisateurs interagissant avec un robot de service et ont montré que les utilisateurs s'imaginant un robot humanoïde avaient une pression plus élevée. Zanchettin *et al.* [Zanchettin *et al.*, 2013] ont utilisé les données brutes provenant de mesures d'ECG, d'EMG et d'EDA pour comparer les réactions d'utilisateurs face à différents mouvements d'un robot bi-bras. Ils ont déterminé que des mouvements humains (implémentés par les auteurs) induisaient des activités physiologiques plus faibles chez les utilisateurs (rythme cardiaque plus faible, moins de contractions musculaires, conductance plus basse) et provoquaient donc moins de stress.

Lorsqu'il s'agit d'obtenir une compréhension plus fine de l'état affectif des utilisateurs, les données brutes des mesures physiologiques ne suffisent plus. C'est le cas lorsque l'on veut obtenir un état affectif absolu de l'utilisateur (tristesse, stress, enthousiasme) qui puisse servir d'entrée au comportement du robot : on peut ainsi déterminer les situations qui provoquent du stress ou de l'inconfort, empêcher qu'elles surviennent ou les modifier pour atténuer ces impressions négatives. Afin d'estimer l'état affectif des utilisateurs, il est nécessaire d'analyser et d'interpréter correctement les données brutes pour positionner cet état sur un système d'échelles prédéfinies. L'échelle la plus utilisée est celle de Lang [Lang, 1995], qui répartit les émotions selon deux dimensions : la *valence* et l'*arousal* (voir Figure 3.14). La valence correspond au caractère positif ou négatif de l'émotion, tandis que l'arousal correspond à l'activation physiologique de l'émotion (intensité, état de vigilance).

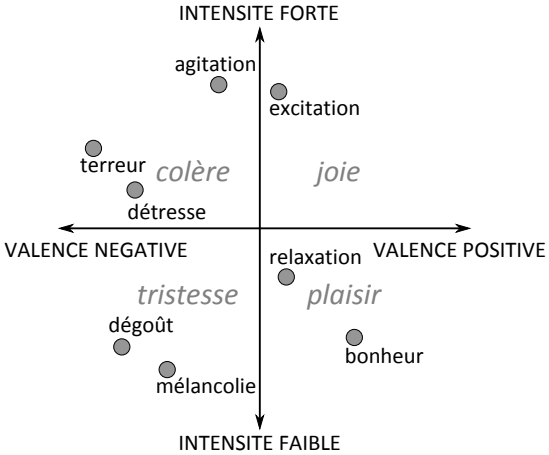


FIGURE 3.14 – Les échelles de valence et d'arousal pour mesurer l'état affectif [Lang, 1995; Kim et Andre, 2008]

Avec ce système d'échelle, la difficulté vient du fait de pouvoir analyser et interpréter les données brutes des mesures physiologiques pour y placer correctement les états affectifs des utilisateurs. Dans leurs études sur l'estimation des états affectifs d'utilisateurs face à des mouvements de robots, Kulić et Croft ont commencé par établir des règles simples pour déterminer les états de valence et d'intensité (*arousal*) à partir de données d'ECG, d'EMG et de SCL [Ku-

lić et Croft, 2005]. Par exemple, une SCL élevée implique une intensité forte (*arousal*) ou un EMG important implique une valence négative. Kulić et Croft ont ensuite utilisé des modèles d'apprentissage à base de chaînes de Markov cachées pour estimer ces états affectifs de manière plus intelligente [Kulić et Croft, 2007].

3.2.3 Les mesures comportementales

Dans l'évaluation de l'interaction homme-robot, Dautenhahn et Werry [Dautenhahn et Werry, 2002] ont introduit un concept nouveau venant de la psychologie, basé sur l'observation des micro-comportements des utilisateurs. Cette approche consiste à observer les réactions des utilisateurs face à une situation ou à un robot en particulier, les annoter et les comptabiliser. Il peut s'agir de mouvements d'approche vers un robot (tendre la main, toucher le robot, le regarder) ou au contraire de mouvements de recul (par peur ou par ennui). Il peut également s'agir de comportements oraux : interpeler le robot, lui poser des questions, lui répondre. L'analyse de ces micro-comportements permet de mieux évaluer la manière dont s'est déroulée l'interaction avec le robot et l'engagement des utilisateurs.

Cette approche a été notamment appliquée par Dautenhahn et Werry à l'observation d'enfants autistes interagissant avec des robots pour déterminer l'intérêt thérapeutique des robots chez ces enfants. Dans une autre étude utilisant le robot Robovie, Kanda *et al.* [Kanda *et al.*, 2004] ont utilisé un système de capture de mouvements pour enregistrer les mouvements des utilisateurs lors de l'interaction avec le robot (voir Figure 3.15) et mesurer des critères comme la distance au robot, le contact visuel, le contact physique, les mouvements synchronisés ou la distance parcourue. Ces observations ont été mises en corrélation avec des réponses subjectives à des questionnaires et ont permis de définir un score d'interaction basé sur les mouvements des utilisateurs. Minato *et al.* [Minato *et al.*, 2005] ont étudié le regard des utilisateurs lors d'un entretien avec un robot humanoïde ou un humain : différentes zones de fixation étaient définies pour déterminer si le contact visuel était maintenu et si le regard pouvait fournir une évaluation du niveau d'anthropomorphisme du robot. Afin de faciliter l'analyse des comportements des utilisateurs, Kooijmans *et al.* [Kooijmans *et al.*, 2007] ont développé un logiciel permettant de choisir, visionner et annoter simplement des données et l'ont appliqué à des cas d'étude variés (interaction avec des personnes dans des écoles ou des musées, voir Figure 3.16).

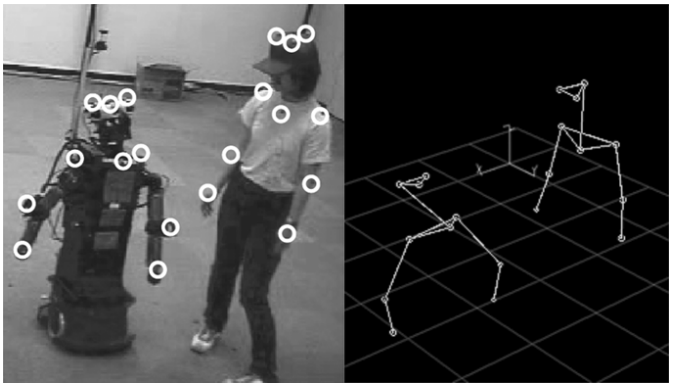


FIGURE 3.15 – Une utilisation de la capture de mouvements pour évaluer l'interaction homme-robot [Kanda *et al.*, 2004]

FIGURE 3.16 – Une évaluation du comportement d'enfants en présence d'un robot [Kooijmans *et al.*, 2007]

3.3 Synthèse générale

Dans ce chapitre, nous nous sommes focalisés sur les différentes méthodologies ayant été utilisées dans la littérature pour évaluer l'interaction homme-robot et son acceptabilité du point de vue des utilisateurs. Ces recherches nécessitent dans un premier temps de procéder à des test utilisateurs. Ces tests sont généralement menés en environnement réel, sous forme enregistrée (images ou vidéos) ou en utilisant la réalité virtuelle. L'avantage des tests réels est qu'ils correspondent avec fidélité à des situations réelles d'interaction entre un utilisateur et un robot physique : les réactions des utilisateurs sont donc véritables et peuvent être directement observées. Les tests sous forme enregistrée et ceux utilisant la réalité virtuelle permettent un plus grand choix dans les situations à proposer aux utilisateurs (paramètres facilement modifiables). La réalité virtuelle permet de plus à l'utilisateur d'être immergé dans l'environnement virtuel aux côtés du robot virtuel et d'interagir avec lui. La question de la pertinence des réactions des utilisateurs dans ces environnements virtuels par rapport aux situations réelles reste cependant posée.

Dans nos recherches, il nous semble pertinent d'utiliser la réalité virtuelle pour plusieurs raisons. Premièrement, elle permet de tester et d'évaluer un grand nombre d'hypothèses qu'il serait laborieux de mettre en place en situation réelle avec des robots physiques : il est par exemple facile de modifier l'apparence d'un robot virtuel, la nature de ses mouvements ou encore son comportement, alors qu'une situation réelle nécessiterait de modifier des programmes complexes, de disposer d'un grand espace et de posséder plusieurs robots physiques parfois coûteux. Deuxièmement, par rapport aux situations enregistrées (photos, vidéos), la réalité virtuelle a l'avantage d'immerger les utilisateurs dans l'environnement virtuel et de les faire interagir avec les robots virtuels de manière pseudo-naturelle. Ceci est primordial puisque l'on veut évaluer l'interaction et la collaboration homme-robot : les utilisateurs doivent être actifs dans le processus d'évaluation, ce qui n'est pas réalisable face à des images ou des vidéos. Cependant, les tests utilisant la réalité virtuelle ne correspondent jamais complètement aux situations réelles : l'existence de biais (sensoriels et moteurs) peuvent perturber le comportement des utilisateurs. Il est donc très important de déterminer si les résultats obtenus par des tests utilisant la réalité virtuelle sont pertinents et rendent bien compte du comportement que les utilisateurs auraient en situation réelle. Pour cela, il est nécessaire de procéder à des comparaisons entre des tests en environnement réel et leurs équivalents utilisant la réalité virtuelle.

Au-delà de la mise en place de tests utilisateurs, une deuxième question méthodologique se pose : celle de l'évaluation de l'acceptabilité. Il ne s'agit pas d'évaluer l'efficacité de l'interaction entre un utilisateur et un robot par des mesures objectives, telles que le temps d'exécution ou la précision d'une tâche, mais d'évaluer l'acceptabilité d'un utilisateur vis-à-vis de l'interaction. C'est une notion subjective dont l'évaluation est difficile. Dans la littérature, les études se plaçant du point de vue des utilisateurs ont utilisé plusieurs moyens pour estimer cette acceptabilité : l'auto-évaluation (questionnaires), les mesures physiologiques (estimation du stress des utilisateurs) et les mesures comportementales (analyse du comportement des utilisateurs). L'auto-évaluation permet de mesurer directement l'acceptabilité mais les réponses des utilisateurs peuvent être biaisées. A l'inverse, les mesures physiologiques et comportementales permettent une analyse plus objective.

Dans nos recherches, centrées sur l'acceptabilité de la collaboration homme-robot du point de vue des opérateurs, il nous semble primordial d'utiliser des questionnaires pour récolter des impressions subjectives : ces questionnaires permettent de cibler directement l'utilisabilité du système, sa prise en main et la satisfaction des opérateurs, mais peuvent également incorporer des questions annexes concernant des aspects sociaux. Ces impressions subjectives doivent cependant être complétées par d'autres types de mesures : dans un contexte industriel, les opérateurs ne sont pas toujours disposés à répondre librement aux questions, d'où un risque de biais dans les résultats. Nous considérons donc que l'utilisation de questionnaires doit être complétée par l'utilisation de mesures physiologiques. Corrélées aux impressions subjectives des opérateurs, ces mesures physiologiques permettent d'estimer leur état affectif lorsqu'ils travaillent en collaboration avec des robots : activité physique, niveau de stress. L'utilisation de mesures comportementales (observation du comportement des opérateurs) pourrait également être envisagée, mais elle n'est pas considérée dans nos recherches car jugée trop complexe à mettre en œuvre et trop spécifique à une tâche donnée.

Chapitre 4

Problématiques et cas d'étude

Les deux chapitres précédents ont permis d'établir des états de l'art sur la collaboration homme-robot et l'acceptabilité d'une part (Chapitre 2) et sur les méthodologies d'évaluation d'autre part (Chapitre 3). Au regard de ces états de l'art, nous explicitons désormais nos problématiques de recherche. Puis nous présentons les cas d'étude qui ont été mis en place pour répondre à ces problématiques.

4.1 Problématiques

Dans cette section, nous revenons sur les états de l'art des Chapitre 2 et Chapitre 3 qui concernent la collaboration homme-robot et les méthodologies d'évaluation de l'acceptabilité. Nous faisons ressortir deux problématiques principales qui constituent nos axes de recherche : les critères d'acceptabilité et l'utilisation de la réalité virtuelle.

4.1.1 Les critères d'acceptabilité de la collaboration homme-robot

Dans le Chapitre 2, nous avons proposé un état de l'art sur la collaboration homme-robot et les critères qui conditionnent son acceptabilité. Au regard de cet état de l'art, nous rappelons dans cette section les positions de nos recherches et nous en tirons une première problématique.

Dans le cadre de la thèse, nous nous focalisons sur les systèmes de collaboration homme-robot du domaine industriel. Certains de ces systèmes sont issus de la cobotique (cobots, IADs, exosquelettes). Pour des raisons de sécurité, ces systèmes cobotiques sont intrinsèquement passifs (une intervention humaine est nécessaire pour leur fonctionnement) : il s'agit d'outils intelligents sans autonomie et sans réelle collaboration interactive. Nous ne les considérons donc pas dans nos travaux. Nous nous concentrons plutôt sur des systèmes collaboratifs dans lesquels les robots sont autonomes et partagent le travail de manière collective avec les opérateurs. C'est le cas des robots-assistants qui peuvent ainsi être considérés comme des partenaires de travail.

La question de l'acceptabilité de la collaboration homme-robot se pose à plusieurs niveaux et le Chapitre 2 a permis d'en présenter les composantes principales. Elle peut traiter d'aspects propres à la société, avec des problématiques liées à l'éthique et à la remplaçabilité des hommes. Elle peut être étudiée du point de vue de l'entreprise, avec des notions de coût, de fiabilité et de sécurité. Enfin, on peut considérer l'acceptabilité du point de vue des opérateurs, avec des critères liés à l'utilisabilité. La notion d'utilisabilité peut notamment être divisée en composantes utilitaires, liées à l'utilisation pratique du système (efficacité perçue, facilité d'utilisation), et en composantes hédonistes, liées à la satisfaction des utilisateurs. Dans notre étude, nous nous

plaçons du point de vue des opérateurs et nous sommes intéressés par déterminer quelles sont les composantes pertinentes de l'acceptabilité dans ce contexte.

Un bref retour sur l'état de l'art du Chapitre 2 nous montre que la robotique industrielle et la robotique de service ne s'intéressent pas (actuellement) aux mêmes composantes de l'acceptabilité. La robotique industrielle considère surtout des notions de coût et de sécurité intrinsèque des robots, mais ne se place que très peu du point de vue des opérateurs. A l'inverse, la robotique de service étudie plutôt le comportement des utilisateurs et les composantes hédonistes de l'acceptabilité, comme le sentiment de relaxation, la sécurité perçue ou le sentiment de satisfaction. Il apparaît ainsi que notre approche, qui consiste à évaluer l'acceptabilité de systèmes collaboratifs du domaine industriel du point de vue des opérateurs, est peu traitée dans la robotique industrielle et pourrait gagner à s'inspirer du domaine de la robotique de service. Du point de vue des opérateurs, il s'agit de déterminer quelles sont les composantes de l'acceptabilité qui leur paraissent les plus importantes.

Différents facteurs peuvent influencer les composantes de l'acceptabilité, qu'elles soient utilitaires ou hédonistes. Dans la littérature, les facteurs d'acceptabilité étudiés par la robotique industrielle et la robotique de service sont différents. La robotique de service se focalise plutôt sur des facteurs liés aux robots, comme leur apparence ou leurs mouvements. A l'inverse, la robotique industrielle se concentre sur des facteurs plus globaux, liés à la configuration de collaboration, comme la distribution spatio-temporelle de l'opérateur et du robot. Dans notre étude, il s'agit également de déterminer comment ces facteurs influencent les différentes composantes de l'acceptabilité.

Notre première problématique regroupe deux questions relatives à l'acceptabilité de la collaboration homme-robot. D'une part, il s'agit de déterminer quelles sont les composantes de l'acceptabilité qui semblent le plus importantes aux yeux des opérateurs. D'autre part, il convient d'évaluer quelles sont les influences de différents facteurs sur ces composantes.

Problématique 1
Du point de vue des opérateurs, dans un contexte industriel, quelles sont les composantes importantes de l'acceptabilité de la collaboration homme-robot et comment sont-elles influencées ?

Pour y répondre, nous proposons de mettre en place des cas d'étude centrés sur différents facteurs de l'acceptabilité, liés aux robots (apparence, mouvements), à la distribution spatiale et à la distribution temporelle des systèmes collaboratifs. L'interprétation des résultats sur chaque cas d'étude permettra d'obtenir des indicateurs de pertinence de chaque composante de l'acceptabilité étudiée.

4.1.2 L'utilisation de la réalité virtuelle

Dans le Chapitre 3, nous avons proposé un état de l'art sur les méthodologies mises en place pour évaluer l'acceptabilité de l'interaction homme-robot du point de vue des utilisateurs. Dans cette section, nous revenons brièvement sur cet état de l'art pour rappeler les directions entreprises par nos recherches et exposer une deuxième problématique.

Les méthodologies appliquées dans la littérature pour étudier l'interaction homme-robot sont toutes basées sur des tests utilisateurs mais avec des modalités différentes. Dans le cadre de nos recherches, nous avons choisi de mener des tests en utilisant la réalité virtuelle : elle permet de proposer un grand choix de situations (modification facile des paramètres), tout en garantissant à l'utilisateur une immersion forte dans l'environnement virtuel et une interaction pseudo-naturelle avec un robot virtuel. Les notions d'immersion et d'interaction sont importantes puisque l'on

souhaite évaluer des situations de collaboration homme-robot : l'utilisateur doit être actif dans le processus d'évaluation.

Afin d'évaluer l'acceptabilité de la collaboration par des opérateurs, nous souhaitons utiliser deux types de mesures : des questionnaires et des mesures physiologiques. Les questionnaires permettent de recueillir les impressions subjectives des opérateurs face au robot dans une situation de collaboration. Les mesures physiologiques permettent d'estimer l'état affectif des opérateurs dans ces situations : intensité de l'activité, niveau de stress, sentiment de peur face au robot. Les résultats de ces deux types de mesures peuvent ensuite être corrélés pour donner plus de signification à leur interprétation : alors que les mesures physiologiques peuvent faire ressortir certains états affectifs des opérateurs, les réponses aux questionnaires peuvent donner des pistes sur les raisons de ces changements émotifs.

Notre méthodologie se base donc sur l'utilisation de la réalité virtuelle pour mener des tests utilisateurs et l'utilisation de questionnaires et de mesures physiologiques pour évaluer l'acceptabilité. La deuxième problématique exposée dans nos recherches concerne la validité d'une telle méthodologie et notamment l'utilisation de la réalité virtuelle. En effet, même si les systèmes actuels de réalité virtuelle permettent désormais une immersion plus importante et une interaction plus naturelle dans des environnements virtuels, il existe toujours des biais sensori-moteurs pouvant perturber le comportement des utilisateurs. Il s'agit alors de déterminer, dans un contexte d'évaluation de l'acceptabilité, si ces biais sont suffisamment réduits pour que les impressions et les réactions des utilisateurs en environnement virtuel soient semblables à celles en environnement réel. Notamment, il s'agit d'étudier si les impressions des opérateurs recueillies par des questionnaires sont comparables en situations réelle et virtuelle et si les changements affectifs décelés par les mesures physiologiques sont similaires dans les deux situations.

La deuxième problématique considérée dans nos recherches concerne donc la méthodologie employée pour évaluer l'acceptabilité :

> **Problématique 2**
> Une méthodologie basée sur des tests utilisant la réalité virtuelle, des questionnaires et des mesures physiologiques est-elle pertinente pour évaluer l'acceptabilité de la collaboration homme-robot ?

Pour déterminer la pertinence d'une telle méthodologie, nous envisageons de mener des tests sur nos cas d'étude à la fois en environnement virtuel et en environnement réel. La comparaison des résultats dans les deux situations permettra de déterminer si la réalité virtuelle est un outil pertinent dans l'évaluation de l'acceptabilité de la collaboration homme-robot.

4.2 Cas d'étude

Pour répondre aux problématiques exposées dans la Section 4.1, trois cas d'étude ont été mis en place. Ces cas d'étude représentent des situations de collaboration différentes avec des degrés d'interaction croissants et permettent d'aborder et de tester un large panel de facteurs.

Le premier cas d'étude se focalise ainsi sur un simple partage d'espace avec une situation où un opérateur et un robot doivent travailler côte à côte : c'est un cas d'étude de la **coprésence**. Les deuxième et troisième cas d'étude se concentrent plutôt sur des situations de collaboration plus forte où l'opérateur et le robot sont face à face et doivent travailler ensemble sur des pièces communes : ce sont des cas d'étude de la **collaboration**. La Figure 4.1 donne une vue d'ensemble de ces cas d'étude et des expérimentations associées.

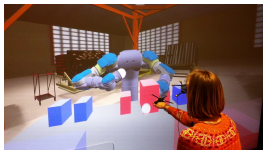
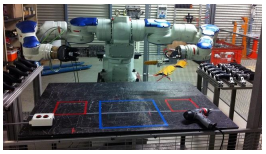
	Coprésence	Collaboration	
Cas d'étude	Cas d'étude n°1 Montage de porte 	Cas d'étude n°2 Echange d'objets 	Cas d'étude n°3 Montage de raccords d'air 
Expérimentations	Expérimentation n°1 - Distribution spatiale - En EV et en ER Expérimentation n°2 - Mouvements du robot - Uniquement en EV	Expérimentation n°3 - Apparence/mouvements - Uniquement en EV	Expérimentation n°4 - Distribution temporelle - En EV et en ER

FIGURE 4.1 – Les cas d'étude et les expérimentations menées au cours de la thèse (EV = environnement virtuel / ER = environnement réel)

4.2.1 Cas d'étude sur la coprésence

Une étape importante dans l'étude de la collaboration homme-robot et de son acceptabilité concerne le partage de l'espace entre un opérateur et un robot. En effet, avant de pouvoir collaborer et travailler ensemble, l'opérateur et le robot doivent apprendre à partager le même espace physique. Il semble donc cohérent que le premier cas d'étude dans nos recherches se consacre à une situation de coprésence.

Ce cas d'étude a été imaginé par les roboticiens et les ergonomes de PSA Peugeot Citroën et s'inspire d'un poste réel de montage de porte en usine automobile. Sur ce poste, un robot et un opérateur doivent travailler côte à côte sur les chaînes de montage. L'opérateur doit notamment poser une feuille d'étanchéité sur la porte, puis le robot doit appliquer une roulette sur les contours de cette feuille pour écraser un cordon de colle (voir Figure 4.2). Au cours du montage, l'opérateur et le robot sont amenés à travailler à des distances plus ou moins proches. Le robot peut détecter la proximité de l'opérateur et s'arrêter si besoin.

Une première expérimentation a été mise en place pour étudier la **distribution spatiale** de l'opérateur et du robot. L'objectif était de déterminer quelle était la manière la plus acceptable de se partager l'espace entre ces deux acteurs, entre une situation éloignée (à distance) et une situation rapprochée (co-localisée). Un scénario de montage en coprésence avec le robot a été spécialement conçu dans le cadre de la chaire pour se rapprocher au mieux d'une situation d'usine. Cette expérimentation a été menée auprès d'opérateurs de chaînes de montage, à la fois en environnement réel et en environnement virtuel (voir Figure 4.3), pour pouvoir comparer le comportement des opérateurs dans chaque situation.

Une deuxième expérimentation a été menée pour étudier l'influence des **mouvements** du robot sur l'acceptabilité des utilisateurs. L'objectif de l'expérimentation était de déterminer quelles caractéristiques du mouvement du robot étaient perçues comme sécurisantes, efficaces, perturbantes ou naturelles, et incitaient le plus les utilisateurs à travailler aux côtés du robot. Cette expérimentation s'est déroulée auprès de personnes de l'école des Mines, uniquement en

FIGURE 4.2 – Le premier cas d'étude mis en place par PSA Peugeot-Citroën : montage de porte en coprésence avec un robot

FIGURE 4.3 – La première expérimentation sur la distribution spatiale, en environnement réel (à gauche) et en environnement virtuel (à droite)

environnement virtuel pour proposer un grand nombre de mouvements différents (voir Figure 4.4).

4.2.2 Cas d'étude sur la collaboration

Au-delà du simple partage d'espace physique, certaines situations de collaboration nécessitent également qu'un opérateur et un robot effectuent des tâches en commun. Dans ces situations, l'opérateur et le robot sont généralement situés face à face et travaillent ensemble sur des pièces communes, le robot apportant des pièces ou assistant l'opérateur. Ceci implique une collaboration plus forte qu'une simple situation de coprésence. Les deuxième et troisième cas d'étude mettent chacun en place une configuration de ce type.

Le deuxième cas d'étude a été imaginé afin d'évaluer l'influence de l'**apparence** et des **mouvements** du robot sur l'acceptabilité d'une telle configuration. Il consiste en un échange d'objets entre un utilisateur et un robot : ceux-ci se situent face à face de part et d'autre d'une table de travail, le robot devant prendre des objets et les tendre à l'utilisateur pour que celui-ci les récupère et les stocke de son côté (voir Figure 4.5). La tâche de collaboration se voulait simple car nous désirions que les utilisateurs soient focalisés sur l'apparence et les mouvements du robot : différents robots étaient présentés aux utilisateurs et chacun possédait des profils de mouvements

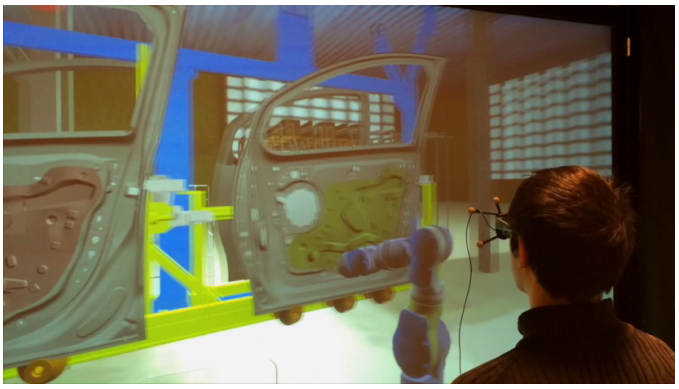


FIGURE 4.4 – La deuxième expérimentation sur les mouvements du robot, en environnement virtuel

différents (proches d'une machine et proches d'un humain). Une expérimentation a été menée auprès d'étudiants de l'école des Mines, uniquement en environnement virtuel pour pouvoir proposer un grand nombre de conditions (plusieurs robots, plusieurs profils de mouvements).

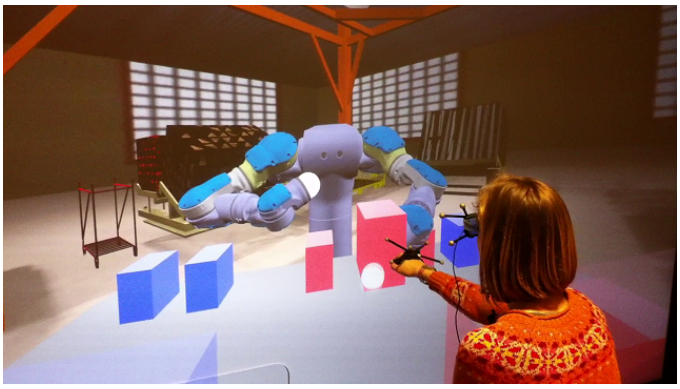


FIGURE 4.5 – Le deuxième cas d'étude mis en place : échange d'objets entre un utilisateur et un robot

Le troisième cas d'étude a été conçu spécifiquement dans le cadre de la chaire et se base sur une situation plus concrète des chaînes de montage : le montage de raccords d'air de moteur. Dans ce cas d'étude, le robot et l'opérateur sont face à face et le robot apporte les pièces nécessaires à l'assemblage (voir Figure 4.6). Le robot peut se contenter de poser les pièces sur la table de travail ou alors assister l'opérateur en lui donnant directement les pièces (contact physique), en supportant la pièce principale et en l'orientant de manière à lui faciliter le travail. L'objectif de ce cas d'étude était d'évaluer la **distribution temporelle** des tâches entre l'opérateur et le robot et de déterminer quel niveau d'interaction et de contrôle du travail collaboratif était perçu comme le plus acceptable de la part des opérateurs. Des expérimentations ont été menées auprès d'opérateurs d'usine, à la fois en environnement réel et en environnement virtuel pour comparer leurs réactions (voir Figure 4.7).

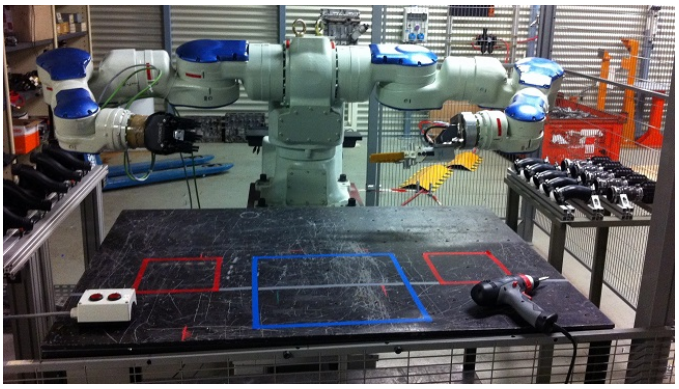


FIGURE 4.6 – Le troisième cas d'étude mis en place : montage de raccords d'air en collaboration avec un robot

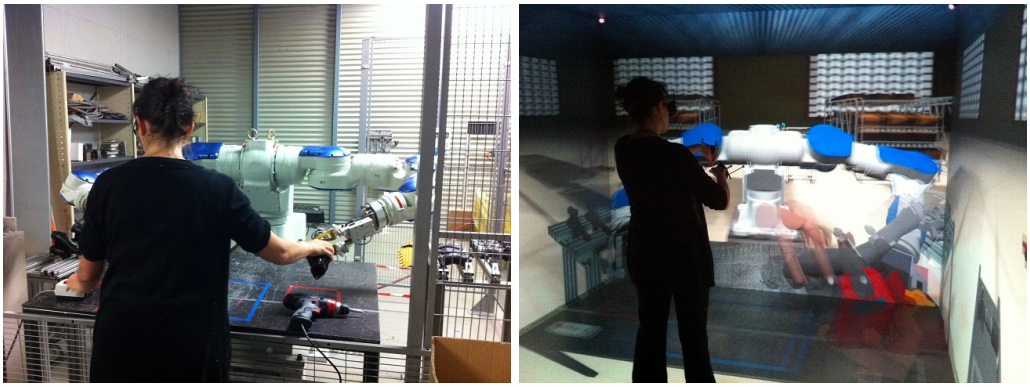


FIGURE 4.7 – La quatrième expérimentation sur la distribution temporelle, en environnement réel (à gauche) et en environnemet virtuel (à droite)

4.3 Organisation de la deuxième partie du manuscrit

La deuxième partie du manuscrit est dédiée à la description des cas d'étude et à l'analyse des résultats des expérimentations.

Nous commençons par exposer les outils qui ont été utilisés pour mettre en place nos cas d'étude et mener nos expérimentations (Chapitre 5). Nous y décrivons notamment le choix du logiciel de réalité virtuelle et les différents types de contrôle de robot utilisés en environnement virtuel. Nous abordons également les mesures d'acceptabilité que nous avons choisi d'utiliser (questionnaires, système de mesures physiologiques).

Le Chapitre 6 se focalise sur les situations de coprésence homme-robot, avec le premier cas d'étude sur le montage de porte. Dans ce chapitre, nous présentons la mise en place du cas d'étude, les deux expérimentations associées et nous analysons les résultats obtenus.

Le Chapitre 7 se concentre sur les situations de collaboration homme-robot, avec le deuxième et le troisième cas d'étude : échange d'objets et montage de raccords d'air de moteur. Nous y décrivons chaque expérimentation et analysons les résultats associés.

Le Chapitre 8 propose une synthèse globale des résultats au regard des problématiques posées dans ce chapitre : les critères importants dans l'acceptabilité de la collaboration homme-robot et la pertinence d'une méthodologie d'évaluation utilisant la réalité virtuelle. Nous apportons

également quelques mots de discussion sur ces thèmes et des perspectives.

Deuxième partie

Expérimentations et analyses

Chapitre 5

Mise en place des cas d'étude et outils

Dans ce chapitre, nous présentons les outils que nous avons utilisés pour mettre en place nos cas d'étude et mener nos expérimentations, à la fois en environnements virtuel et réel, et les outils utilisés pour évaluer l'acceptabilité. Nous commençons par aborder les outils liés aux expérimentations en environnement virtuel, avec le choix de l'environnement de simulation et les différentes manières de contrôler des robots en environnement virtuel. Puis nous présentons dans quel cadre ont été menées les expérimentations en environnement réel. Enfin, nous exposons nos choix quant aux outils d'évaluation de l'acceptabilité, avec l'utilisation de questionnaires et d'un système de mesures physiologiques.

5.1 Cas d'étude en environnement virtuel

Dans notre étude, nous utilisons la réalité virtuelle pour simuler des configurations de collaboration homme-robot dans lesquelles les opérateurs sont immergés et peuvent interagir de manière pseudo-naturelle avec des robots virtuels. L'intérêt de la réalité virtuelle est de pouvoir proposer et tester une multitude de conditions différentes, facilement et rapidement : apparence et mouvements des robots, distribution spatio-temporelle de l'opérateur et du robot, scénarios d'interaction.

Pour mettre en place des cas d'étude en environnement virtuel, il est d'abord nécessaire de choisir un environnement de simulation. Il s'agit ensuite de modéliser et contrôler des robots virtuels dans cet environnement avant d'y faire évoluer un utilisateur. L'un des facteurs d'acceptabilité à étudier au cours des expérimentations concerne notamment l'impact que peuvent avoir des mouvements biologiques sur les utilisateurs. L'ensemble de ces problématiques est traité dans cette section.

5.1.1 Environnement de simulation

Les installations utilisées pour mettre en place les cas d'étude en environnement virtuel étaient situées soit à l'école des Mines, soit à PSA Peugeot Citroën sur le site de Vélizy. Le Centre de Robotique de MINES ParisTech dispose d'un écran rétroprojeté (3,1 m $\times$ 1,7 m) et d'un système de caméras de capture de mouvements (voir Figure 5.1). Cette installation a été utilisée pour prototyper les cas d'étude et mener des tests ne nécessitant pas un large champ de vision. Le Centre de Réalité Virtuelle de PSA Peugeot Citroën (voir Figure 5.1) possède un

CAVE 5 faces et un CAVE 3 faces (Holospace). Ces installations ont été utilisées pour mener des tests avec des opérateurs d'usine, dans des conditions proches de la situation réelle (systèmes spacieux, large champ de vision).

FIGURE 5.1 – Les installations de réalité virtuelle utilisées au cours des expérimentations : l'écran de MINES ParisTech, l'Holospace et le CAVE de PSA Peugeot Citroën

L'environnement de simulation utilisé pour mettre en place les cas d'étude devait être compatible entre chaque installation (MINES ParisTech et PSA Peugeot Citroën). C'est le logiciel Virtools qui a été choisi pour mettre en place cet environnement. Le logiciel Virtools permet de créer des scènes 3D, d'y intégrer des interactions avec des objets et d'y faire évoluer des utilisateurs en utilisant la capture de mouvements. Au-delà des fonctionnalités liées à la réalité virtuelle, il a fallu incorporer des modèles 3D de robots industriels et développer des outils pour pouvoir les contrôler en environnement virtuel.

Dans nos études, nous considérons des robots industriels de type bras articulé, dont les modèles 3D sont généralement disponibles sur les sites des constructeurs (certains modèles ont été fournis par PSA Peugeot Citroën). En environnement virtuel, la manière la plus simple de modéliser un robot de ce type consiste à utiliser une hiérarchie adaptée à sa structure cinématique. Chaque joint peut être représenté par un repère 3D, chacun étant enfant du joint précédent, tandis que les segments du robot sont représentés par des objets 3D et peuvent être parentés au joint correspondant. Ainsi, la rotation d'un joint (repère 3D) entraîne le mouvement de toutes les parties successives du robot. Plusieurs types de robots ont été modélisés en utilisant cette architecture : des exemples sont proposés sur la Figure 5.2 avec leur hiérarchie correspondante.

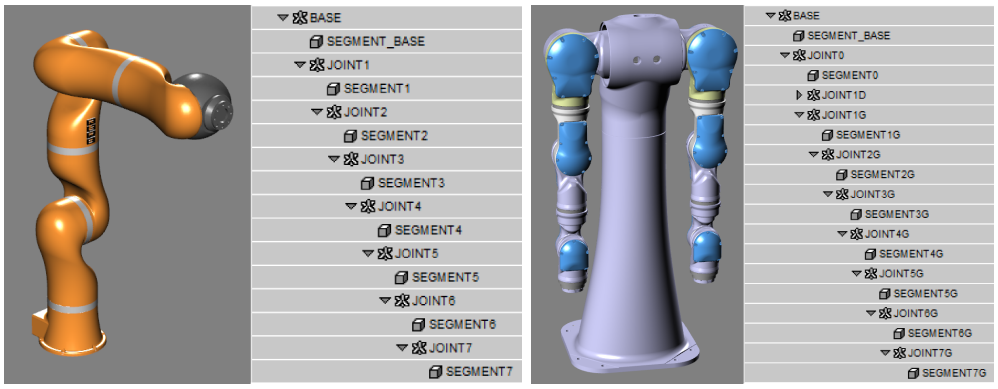


FIGURE 5.2 – Des exemples de modèles de robots virtuels (Kuka LWR, Motoman SDA10) et leur hiérarchie dans l'environnement de simulation Virtools

Une fois les modèles de robots importés dans l'environnement de simulation, plusieurs outils ont été envisagés afin de les contrôler en environnement virtuel.

5.1.2 Contrôle de robot virtuel

Dans cette partie, nous étudions la question du contrôle de robots virtuels préalablement modélisés en environnement virtuel (nous ne considérons pas le contrôle de robots réels). De manière générale, les logiciels de réalité virtuelle ne proposent pas de fonctionnalités de contrôle de robot virtuel. Deux solutions peuvent être envisagées. La première solution repose sur l'utilisation de logiciels externes s'occupant du contrôle et pouvant envoyer les informations du robot (état des joints) au logiciel de réalité virtuelle. La deuxième solution consiste à implémenter soi-même des algorithmes de contrôle dans les logiciels de réalité virtuelle.

A première vue, la méthode la plus simple pour contrôler des robots en environnement virtuel consiste à utiliser les logiciels des constructeurs industriels, qui permettent de simuler et programmer des modèles numériques de leurs robots physiques. L'avantage est de pouvoir tester des situations et programmer des trajectoires hors-ligne avant de les incorporer sur le robot physique : ceci représente un gain de temps et permet de ne pas perturber l'activité des robots physiques en production. Le contrôle des robots virtuels étant basé sur le contrôle des robots physiques, les simulations se veulent fidèles aux situations réelles qu'elles représentent : configuration du robot, limites d'axes, vitesses limites, détection des collisions. C'est l'un des avantages principaux de ces logiciels : la garantie que le comportement du robot virtuel reproduit fidèlement celui du robot physique.

Puisque ces logiciels ne possèdent pas de fonctionnalités de réalité virtuelle, il est nécessaire de coupler leur utilisation à celle d'un logiciel de réalité virtuelle en les faisant communiquer entre eux (voir Figure 5.3). Le logiciel de robotique envoie les données du robot au logiciel de réalité virtuelle pour mettre à jour l'état des joints. En retour, le logiciel de réalité virtuelle envoie les données liées à l'utilisateur qui peuvent avoir une influence sur le contrôle du robot (distance au robot, position des mains). Cette architecture a été implémentée par PSA Peugeot Citroën et utilisée avant le début de ces recherches.

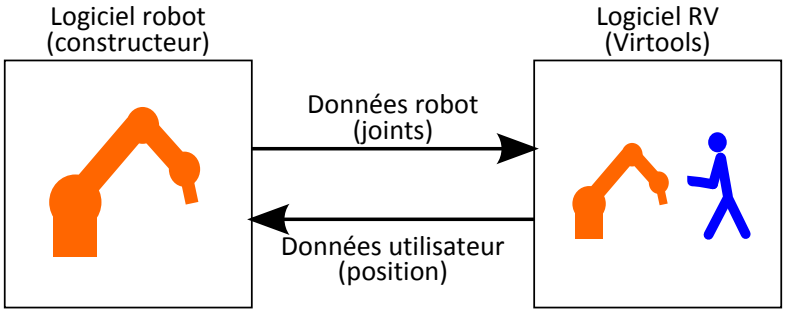


FIGURE 5.3 – Communication entre un logiciel de robotique et un logiciel de réalité virtuelle

L'une des contraintes principales de ce genre d'architecture est l'obligation d'utiliser les algorithmes et les trajectoires présents dans les logiciels des constructeurs de robots : il est impossible d'utiliser ses propres algorithmes de contrôle. Or, la manière dont les robots effectuent leurs mouvements constitue l'un des facteurs de notre étude sur l'acceptabilité de la collaboration homme-robot. Nous sommes particulièrement intéressés par la génération de mouvements biologiques sur les robots et par l'étude de leur impact sur la perception des opérateurs. Il a donc été nécessaire d'envisager d'autres solutions pour le contrôle de robot en environnement virtuel.

Afin d'obtenir plus de liberté dans la génération des mouvements des bras robotisés, nous avons envisagé deux solutions. La première solution a consisté en l'intégration d'algorithmes de

cinématique inverse dans le logiciel de réalité virtuelle. Cette intégration a permis de contrôler des robots soit par des trajectoires prédéfinies, soit par la capture des mouvements du bras humain. La deuxième solution s'est concentrée sur l'intégration de modèles du mouvement humain sur des robots. Il a été fait appel à une société extérieure pour générer ces modèles de mouvements. Ces deux solutions sont exposées en détail dans la suite.

5.1.3 Intégration d'algorithmes de cinématique inverse

La première solution envisagée pour contrôler des robots virtuels avec plus de liberté a été d'intégrer des algorithmes de cinématique inverse. L'idée derrière cette intégration est de faire suivre aux robots des trajectoires prédéfinies dont les caractéristiques correspondent à celles d'un mouvement humain. Les trajectoires peuvent également être issues de la capture des mouvements d'un bras humain (positions et orientations de la main, du coude, de l'épaule). Pour faire suivre ces trajectoires aux robots, il est nécessaire de contrôler la position de leurs effecteurs finaux ainsi que celles de joints intermédiaires si nécessaire.

Pour une introduction aux principes de la cinématique directe et de la cinématique inverse, nous invitons le lecteur à lire l'Annexe A. C'est dans cette annexe que sont décrits les algorithmes de cinématique inverse que nous avons utilisés. Ces algorithmes ont été implémentés par Buss et Kim [Buss et Kim, 2005] (transposée de la jacobienne, pseudo-inverse, technique de Levenberg-Marquardt et amélioration) et le code source est disponible en ligne [1]. Ils permettent un contrôle en temps réel de n'importe quelle structure de chaîne non fermée (joints rotationnels, effecteurs multiples) par cinématique inverse.

Ces algorithmes sont basés sur une structure en arbre de la chaîne de joints. Chaque type de robot peut ainsi être représenté par un arbre spécifique (voir Figure 5.4) : chaque nœud correspond à un joint du robot (la racine correspond au premier joint) et chaque feuille représente un effecteur. Chaque nœud contient les informations du joint correspondant : position (locale et globale), axe de rotation (local et global), angle de rotation, position dans l'arbre.

L'intérêt d'une structure en arbre est que l'on peut traiter différentes configurations de robots. Dans le cas d'un simple bras manipulateur, l'arbre utilisé est linéaire avec une unique feuille correspondant à l'effecteur du bras (voir Figure 5.4), qui doit suivre une position dans l'espace. Dans le cas d'un robot bi-bras, il suffit de créer un arbre correspondant avec deux branches (voir Figure 5.4). Afin de contrôler la position d'un joint intermédiaire (et pas seulement la position de l'effecteur final), on peut rajouter une feuille à l'arbre au niveau du joint en question pour créer un effecteur supplémentaire (fictif, superposé au joint) qui suit la position d'un objet supplémentaire dans l'espace (voir Figure 5.4). Enfin, on peut également prendre en compte les orientations des effecteurs : en ajoutant deux feuilles adjacentes à l'effecteur, on peut créer un trièdre (position de l'effecteur, position + vecteur directeur, position + vecteur hauteur) qui représente l'orientation de l'effecteur (voir Figure 5.4). En définissant un trièdre-cible dans l'espace (3 points), l'arbre permet ainsi à l'effecteur de suivre la position et l'orientation de l'objet considéré. Ce procédé permet d'utiliser toujours les mêmes algorithmes avec seulement des positions. Une meilleure solution consisterait à modifier le cœur des algorithmes afin de prendre en compte les orientations au niveau du calcul de la jacobienne.

L'utilisation des algorithmes de cinématique inverse suit le processus de la Figure 5.5. Dans un premier temps, la structure du robot est utilisée pour construire un arbre associé (phase d'initialisation). Une fois l'arbre construit, celui-ci est mis à jour itérativement en fonction de l'état des joints actuel et des états-cibles à atteindre (phase de mise à jour) : les états-cibles sont

1. http://math.ucsd.edu/~sbuss/ResearchWeb/ikmethods/index.html

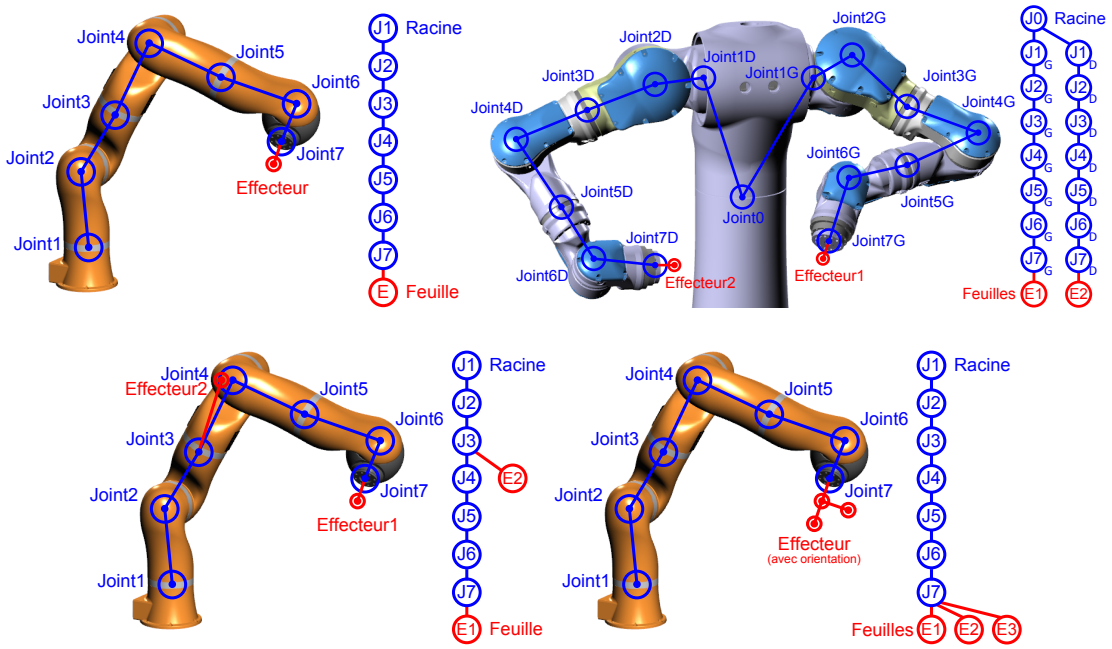


FIGURE 5.4 – Correspondance robot - arbre pour une configuration linéaire (en haut à gauche), une configuration à deux bras (en haut à droite), une configuration avec un contrôle sur un joint intermédiaire (en bas à gauche) et une configuration avec prise en compte de l'orientation de l'effecteur (en bas à droite)

récupérés, la jacobienne du système est calculée et l'état des nœuds de l'arbre est mis à jour en utilisant l'un des algorithmes cités en Annexe A. A tout moment, il est possible de connaître les informations des nœuds (position, angle de rotation) en remontant la structure en arbre. Puis, lors de la mise à jour itérative de l'arbre, les joints du robot virtuel (repères 3D) sont modifiés en temps réel en fonction des informations (angles de rotation) des nœuds de l'arbre (phase de correspondance).

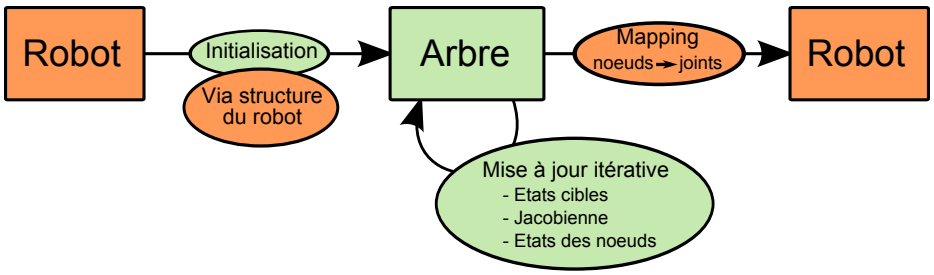


FIGURE 5.5 – Schéma d'initialisation et de mise à jour de l'arbre en correspondance avec le modèle numérique du robot

Les algorithmes implémentés par Buss et Kim [Buss, 2004] ont été adaptés à notre cas d'étude (le contrôle de robot virtuel) et ont fait l'objet de la création d'une librairie orientée objet (C++). Cette librairie a ensuite été directement intégrée dans le logiciel de réalité virtuelle Virtools sous la forme d'un bloc à importer dans un script (voir Figure 5.6). Ce bloc prend en entrée la structure du robot considéré (hiérarchie des repères 3D servant à l'initialisation de

l'arbre, stockée sous forme texte) et plusieurs objets 3D de la scène (servant de cibles), dont les positions et orientations sont continuellement fournies aux algorithmes pour la mise à jour de l'arbre.

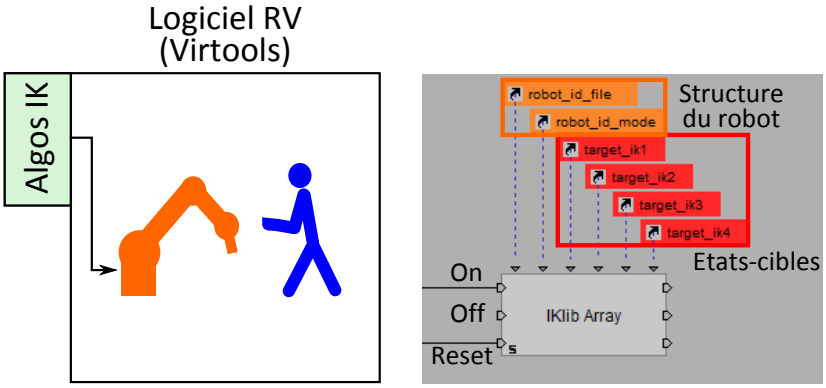


FIGURE 5.6 – Schéma de l'intégration d'algorithmes de cinématique inverse dans un logiciel de réalité virtuelle et le bloc associé à importer dans Virtools

Cette implémentation a été utilisée pour contrôler des modèles numériques de robot et leur faire suivre des objets virtuels dans l'espace. Il est par exemple possible de faire suivre une trajectoire prédéfinie au robot : l'effecteur du robot suit un repère 3D (position et orientation si nécessaire) qui évolue selon cette trajectoire (voir Figure 5.7). Le repère 3D peut également étre placé directement sur la main d'un utilisateur dans l'environnement virtuel : l'utilisateur peut ainsi contrôler l'effecteur grâce à sa main (voir Figure 5.7). En rajoutant une cible sur le coude de l'utilisateur, et en rajoutant un effecteur supplémentaire sur un joint intermédiaire du robot, on peut contrôler le bras du robot de manière plus complexe en simulant la configuration d'un bras humain.

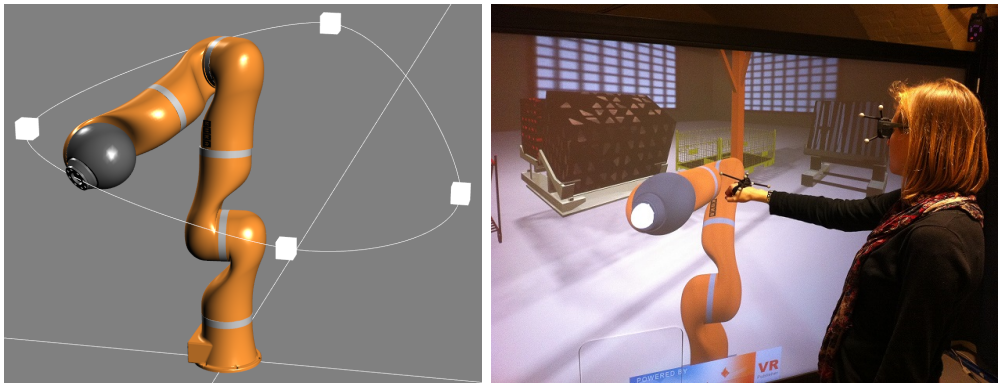


FIGURE 5.7 – Les algorithmes de cinématique inverse pour le suivi de trajectoire et le suivi de mouvements d'un bras humain

L'utilisation de ces algorithmes, même si elle possède de sérieux avantages (utilisation en environnement virtuel, liberté des mouvements du robot), se confronte à certains inconvénients. Les algorithmes implémentés permettent bien aux effecteurs de suivre des cibles en temps réel, mais ils ne prennent pas en compte de contraintes supplémentaires telles que les limites d'axes des joints ou les vitesses maximales du robot. Ainsi, le comportement du robot est entièrement régi par le mouvement des repères 3D qui constituent les cibles des algorithmes. De plus, l'utilisation

de ces algorithmes pour simuler des mouvements naturels de bras humain n'est pas facile. On peut faire correspondre la main et le coude d'un utilisateur à des joints spécifiques du robot pour y parvenir, mais le résultat n'est pas forcément garanti : un bras humain et un bras robotisé ont deux structures différentes (configuration des joints, taille des segments), et plus on rajoute d'états-cibles au système, plus on réduit les degrés de liberté du bras robotisé, et plus l'aspect naturel du mouvement peut disparaître.

Les techniques de *motion retargeting* (retranscription du mouvement) [Gleicher, 1998] permettent de résoudre le problème de la transcription du mouvement d'une personne vers un personnage virtuel ayant une morphologie différente. Le problème de la génération de mouvements naturels pour des bras robotisés reste cependant différent (non seulement la morphologie, mais également la structure cinématique diffèrent entre un bras robotisé et un bras humain) et doit être traité de manière plus globale. C'est pourquoi de nouveaux algorithmes se basant sur des modèles du mouvement humain ont été implémentés et intégrés pour le contrôle de robot virtuel.

5.1.4 Intégration de modèles du mouvement humain

L'utilisation basique d'algorithmes de cinématique inverse, pour le suivi de trajectoires prédéfinies ou de mouvements du bras humain, ne permet pas de représenter toutes les caractéristiques du mouvement humain. Afin de doter les robots de mouvements plus fins et plus biologiques, nous nous sommes concentrés sur l'intégration de modèles du mouvement humain. Pour cela, il est d'abord nécessaire de déterminer les caractéristiques d'un mouvement humain et de les modéliser pour ensuite les implémenter sur des robots.

5.1.4.1 Les caractéristiques du mouvement humain

Dans la littérature, un grand nombre d'études ont tenté de déterminer ce qui rendait le mouvement humain si spécifique et se sont efforcées de déceler des caractéristiques invariantes. Fitts [Fitts, 1954] a mis en avant les relations entre la vitesse, l'amplitude et la précision du mouvement dans des tâches de pointage : la vitesse de pointage a tendance à augmenter avec la distance à parcourir, mais diminue lorsque la précision du pointage demandé est grande. Morasso [Morasso, 1981] a montré, dans une expérience où des personnes devaient déplacer leur main d'un point à un autre, que la trajectoire suivie était toujours rectiligne, avec un profil de vitesse selon une courbe en cloche, résultant en des mouvements lisses. A la même époque, Viviani et Terzuolo [Viviani et Terzuolo, 1982] ont mis en évidence une relation entre la vitesse tangentielle de la main et le rayon de courbure des trajectoires dans des mouvements de dessin et d'écriture : la vitesse tangentielle de la main a tendance à être proportionnelle au rayon de courbure de la trajectoire à la puissance 1/3 (une formulation équivalente relie la vitesse angulaire à la courbure de la trajectoire à la puissance 2/3, d'où le nom de loi de puissance 2/3).

Bien que le mouvement humain puisse être caractérisé par certains invariants, la variabilité d'un tel mouvement a également une place importante dans sa caractérisation. Cette variabilité apparaît lors de la répétition de certains gestes par un ou plusieurs individus : les gestes effectués ne sont jamais complètement semblables entre eux. Plutôt que d'être examinée comme du bruit, cette variabilité devrait être considérée comme une caractéristique importante du mouvement humain.

Même si les caractéristiques du mouvement humain ne sont pas déterminées avec certitude, le cerveau humain (au niveau neurologique) est capable de reconnaître des mouvements humains avec très peu d'indices. Johansson [Johansson, 1973] a montré que des personnes étaient capables

de discerner des mouvements humains représentés seulement par quelques points lumineux et de déterminer s'ils s'agissaient de mouvements de marche, de course ou de danse. En environnement virtuel, Vercher [Vercher, 2006] a mis l'accent sur l'importance de la perception des mouvements biologiques et sur l'intérêt de la réalité virtuelle pour aider à étudier ces problématiques.

Au niveau de la perception des mouvements de robots, Kilner *et al.* [Kilner *et al.*, 2003] ont montré que les individus faisaient (inconsciemment) la distinction entre des mouvements effectués par des humains et des mouvements effectués par des robots. Des études supplémentaires ont suivi [Oztop *et al.*, 2004; Chaminade *et al.*, 2005; Kilner *et al.*, 2007; Kupferberg *et al.*, 2011] pour déterminer si des profils de mouvements différents pouvaient influencer cette distinction.

5.1.4.2 La modélisation du mouvement humain

Afin de reproduire le mouvement humain le plus fidèlement possible, plusieurs modèles empiriques ont vu le jour, dont les plus importants sont présentés dans la suite. Ces modèles tentent de reproduire certains aspects du mouvement humain (vitesse en cloche, mouvements lisses, précision) et utilisent des heuristiques pour y parvenir. Ces heuristiques sont généralement basées sur des problèmes de contrôle optimal : la trajectoire retenue est celle optimisant un coût au cours du mouvement [Simmons et Demiris, 2004]. La différence entre chaque modèle s'effectue sur les critères retenus du mouvement et sur le choix du coût à optimiser, sensé capturer les caractéristiques du mouvement humain.

Flash et Hogan [Flash et Hogan, 1985] ont privilégié l'aspect lisse du mouvement et ont tenté de reproduire des trajectoires biologiques ayant des profils de vitesse en cloche. Ils ont alors proposé un modèle basé sur la minimisation de la secousse (dérivée de l'accélération) de l'effecteur au cours du mouvement (*minimum jerk*). Le critère à minimiser (en 2 dimensions, avec les coordonnées de la main) est de la forme suivante :

$$C_J = \frac{1}{2}\int_0^{t_f}\left(\left(\frac{d^3x}{dt^3}\right)^2 + \left(\frac{d^3y}{dt^3}\right)^2\right)dt$$

La résolution de ce problème donne une trajectoire entièrement déterminée en fonction des positions initiales et finales et du temps total du mouvement (t_f).

Uno *et al.* [Uno *et al.*, 1989] ont critiqué ce modèle en notant qu'il ne prenait en compte que la cinématique du mouvement et pas sa dynamique. Uno *et al.* ont alors tenté de reproduire des mouvements humains ayant des caractéristiques souples au niveau des vitesses des joints (plutôt que de raisonner sur les effecteurs). Un autre modèle, désigné par *minimum torque-change*, a donc été proposé, basé sur la minimisation de la dérivée des couples de chaque joint du système (z_i). Le critère à minimiser est le suivant :

$$C_T = \frac{1}{2}\int_0^{t_f}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{dz_i}{dt}\right)^2 dt$$

Les modèles précédents tentent de capturer l'aspect lisse du mouvement, mais ne prennent pas en compte de critères de précision ni ne peuvent expliquer le contrôle moteur au niveau du système nerveux [Simmons et Demiris, 2004]. C'est pourquoi Harris et Wolpert [Harris et Wolpert, 1998] ont considéré un modèle basé sur le bruit des signaux neuronaux qui minimise la variance de la position finale de la main dans un mouvement donné. Ce modèle est souvent désigné par *minimum variance* ou *signal-dependent noise*.

Gibet *et al.* [Gibet *et al.*, 2004] ont proposé une revue intéressante des différents modèles existants sur les invariants du mouvement humain. Cette revue reprend le profil de vitesse en

cloche, la loi de Fitts, la loi de puissance 2/3 de Viviani et les considérations de mouvement lisse (*minimum jerk*). Vercher [Vercher, 2006] a également présenté une revue de quelques invariants du mouvement biologique et a mis en avant l'importance du rôle du système nerveux central dans la génération des mouvements humains [Vercher et Bourdin, 2012].

Bien que ces modèles, lorsque confrontés à des données réelles, s'approchent au mieux du mouvement biologique humain, ils ne constituent que des modèles empiriques qui restent utilisables seulement dans leur domaine de validité et qui sont limités à certains cadres d'application. Ils ne permettent pas de modéliser toutes les caractéristiques du mouvement humain, notamment sa variabilité et certains gestes complexes.

5.1.4.3 Intégration d'heuristiques du mouvement humain pour des robots

Dans notre étude sur l'acceptabilité de la collaboration homme-robot, il nous semblait intéressant de comparer des situations dans lesquelles les robots se comportaient de manière mécanique (mouvements industriels) ou de manière humaine (mouvements biologiques). Nous avons ainsi envisagé d'implémenter et d'intégrer des heuristiques du mouvement humain pour des structures de robots. Le choix des heuristiques à été établi en relation avec l'entreprise extérieure SpirOps (spécialisée dans l'intelligence artificielle et l'animation, appliquées aux domaines de la simulation, de la robotique et des jeux vidéos).

Les trois critères importants du mouvement humain sur lesquels nous voulions nous focaliser sont représentés en Figure 5.8 :

- L'aspect de la base du robot (P_1) : rigide ou souple ;
- L'aspect de l'effecteur du robot (P_2) : rigide ou souple ;
- Le profil de vitesse des trajectoires (P_3) : linéaire ou anthropomorphe.

Pour chacun des trois critères, nous voulions pouvoir modifier de manière continue l'aspect du mouvement des robots, entre un aspect mécanique et un aspect humain.

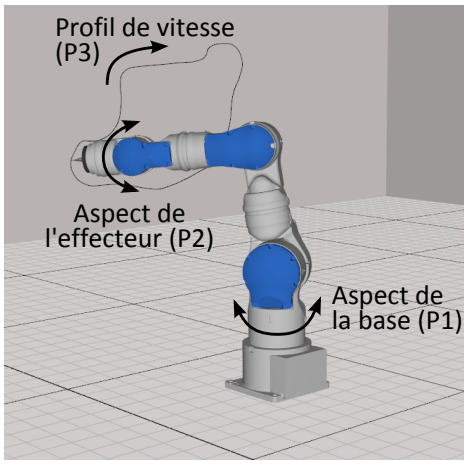


FIGURE 5.8 – Les trois caractéristiques utilisées pour paramétrer les mouvements des robots

L'aspect souple de la base correspond à un phénomène de retard et d'inertie de la base du robot par rapport au mouvement du bras, comme lorsqu'une personne doit atteindre un objet éloigné (voir Figure 5.9). Lorsque l'aspect désiré est mécanique, la base du robot bouge de manière rigide et instantanée (à la manière d'une solution traditionnelle de cinématique inverse). Au contraire, lorsque l'aspect désiré est souple, la base du robot se déplace avec un retard en

oscillant autour de l'orientation désirée avant de se stabiliser. L'effet d'inertie peut être réglé par le temps de stabilisation et le taux d'amortissement (régime pseudo-oscillatoire, régime critique).

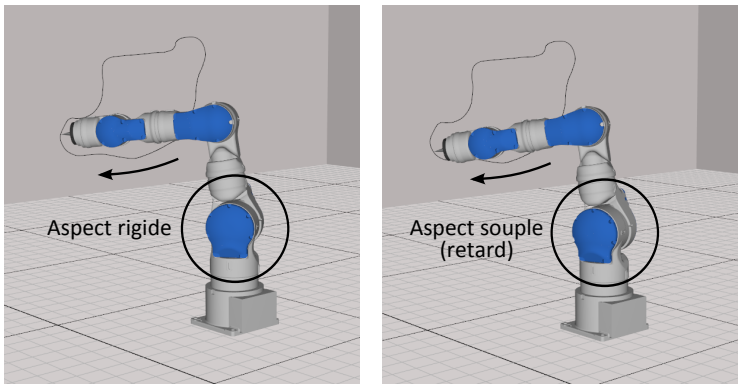


FIGURE 5.9 – Les aspects rigide et souple de la base du robot

L'aspect souple de l'effecteur correspond à un phénomène d'inertie de l'effecteur, couplé à une flexibilité du joint précédent. Lorsque l'aspect désiré du poignet est mécanique, c'est l'effecteur du robot qui guide le mouvement de manière rigide et instantanée. A l'inverse, lorsque l'aspect désiré du poignet est souple, c'est l'avant-dernier joint du robot qui guide le mouvement, à la manière des mouvements d'un peintre (voir Figure 5.10) : l'effecteur du robot est plus flexible (rotation entre l'effecteur et le joint précédent selon deux axes : pitch et roll) et se déplace avec une certaine inertie (retard, oscillations). L'aspect flexible est paramétré par des angles maximums de rotation (pitch et roll), tandis que l'inertie est réglée par le temps de stabilisation et le taux d'amortissement.

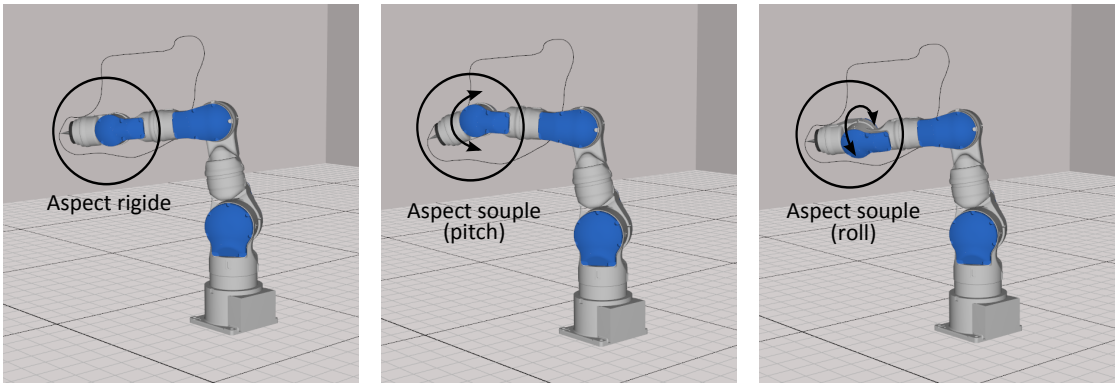


FIGURE 5.10 – Les aspect rigide et souple de l'effecteur du robot. L'aspect souple peut s'effectuer selon deux angles : pitch et roll.

Concernant la vitesse de parcours des trajectoires, le mouvement peut évoluer entre un profil mécanique et un profil anthropomorphe. Le profil mécanique correspond à un parcours linéaire à vitesse constante. Le profil anthropomorphe suit la loi de puissance 2/3 établie par Viviani [Viviani et Terzuolo, 1982] et formalisée par Gibet *et al.* [Gibet *et al.*, 2004] :

$$v = K * \left(\frac{1}{C + A}\right)^B$$

où K, A et B sont des constantes ($K = 1/3$, $A = 0,01$, $B = 1/3$) et C est la courbure de la trajectoire.

L'intégration des heuristiques choisies sur des structures de robots a été effectuée spécialement pour nos travaux par l'entreprise SpirOps. L'intégration a pris la forme d'une librairie C++ et d'un logiciel de démonstration permettant de visualiser les mouvements des robots et de les modifier (voir Figure 5.11).

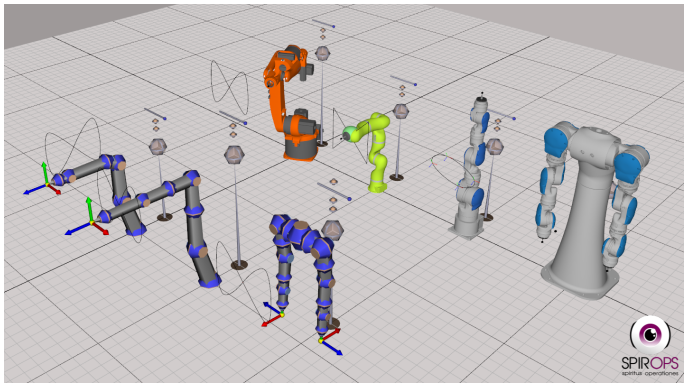


FIGURE 5.11 – L'environnement de la librairie SpirOps pour le contrôle de robot par mouvement humain

L'ensemble des trois critères du mouvement (inertie sur la base, inertie sur l'effecteur, profil de vitesse) peuvent être modifiés indépendamment ou à l'aide d'une variable globale, dite d'anthropomorphisme, qui contrôle les trois à la fois. Cette variable globale prend des valeurs continues entre 0 et 1, 0 indiquant un mouvement proche d'une machine et 1 un mouvement proche d'un humain. Pour chaque valeur entre 0 et 1, des valeurs spécifiques sont prédéfinies pour les trois critères du mouvement. Par exemple, une valeur d'anthropomorphisme à 0 détermine un profil de vitesse linéaire, alors qu'une valeur d'anthropomorphisme à 1 spécifie un profil de vitesse suivant la loi de puissance 2/3 ; une valeur intermédiaire entre 0 et 1 effectue un mélange proportionné entre les deux profils de vitesse.

La librairie SpirOps peut contrôler plusieurs structures de robots (voir Figure 5.12) : les robots 6 axes (comme le robot Kuka KR5), les robots 7 axes (comme les robots Kuka LWR et Motoman SIA10) et les robots 15 axes (comme le robot bi-bras Motoman SDA10). Tous les robots sont définis dans un fichier de configuration à l'aide d'un nom et d'une liste de joints, chaque joint comprenant sa position dans la hiérarchie, son axe de rotation, sa position relative et éventuellement ses limites d'axe.

La librairie SpirOps considère également plusieurs types de trajectoires (voir Figure 5.13). Ces trajectoires représentent les tâches effectuées par les robots : elles peuvent être souples (courbes de Bézier) ou rectilignes et peuvent imposer des contraintes en orientation. Ces trajectoires sont stockées dans un fichier de configuration en spécifiant le nom et la liste des points de chaque courbe (positions dans l'espace, orientations).

Enfin, un troisième fichier de configuration permet de définir le comportement global des robots. Ce fichier place chaque robot et chaque trajectoire dans l'espace et indique quelles tâches effectuer pour chaque robot (voir Figure 5.14). C'est aussi dans ce fichier que sont paramétrés les critères du mouvement de chaque robot : variable d'anthropomorphisme, profil de vitesse, inerties sur l'effecteur et sur la base.

La librairie SpirOps a été utilisée pour contrôler des robots virtuels dans le logiciel de réalité virtuelle Virtools. Plutôt que d'intégrer cette librairie directement dans le logiciel (sous forme

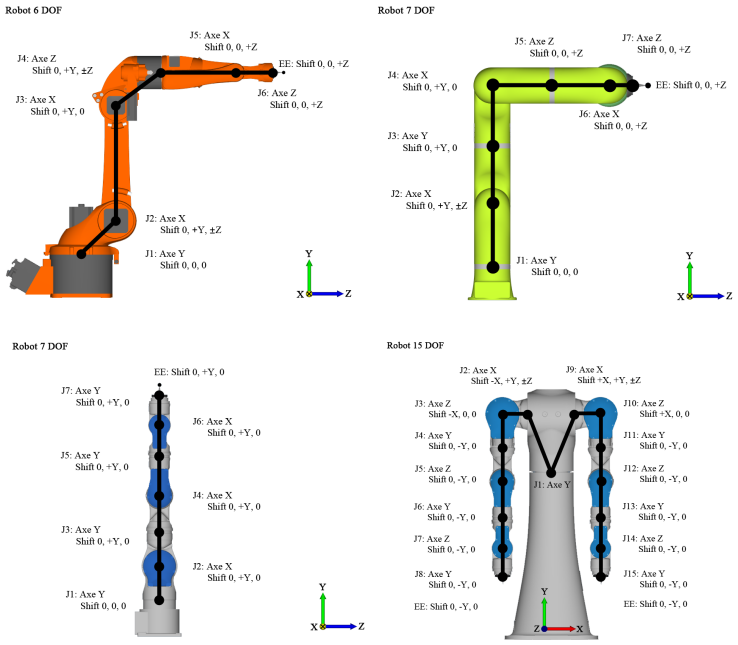


FIGURE 5.12 – Les structures de robots prises en compte par la librairie SpirOps

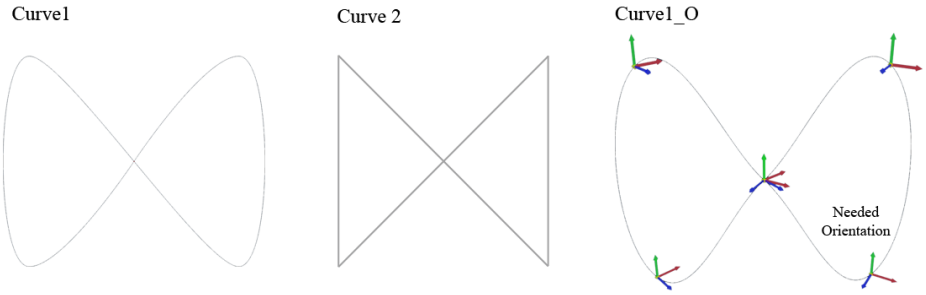


FIGURE 5.13 – Des exemples de trajectoires définies par la librairie SpirOps

d'un bloc), il a été décidé de faire communiquer un logiciel externe (incorporant la librairie SpirOps) et le logiciel Virtools. Ainsi, le logiciel fourni par SpirOps et utilisant la librairie de mouvements anthropomorphes a été intégré dans une architecture client/serveur (à base de VRPN [2]). Les serveurs (un pour chaque robot) envoient les informations des joints de chaque robot (sous la forme de positions et de quaternions) depuis le logiciel SpirOps jusqu'au logiciel Virtools. Inversement, Virtools renvoie des informations concernant la scène virtuelle (position et orientation des tâches, contraintes angulaires du robot, vitesse du robot) qui sont réceptionnées par les clients du logiciel SpirOps (voir Figure 5.15).

Le choix d'une architecture en communication a été fait par souci de réutilisabilité : les algorithmes SpirOps peuvent ainsi être réutilisés dans d'autres logiciels de réalité virtuelle (tel que Unity3D). Ce choix impose cependant quelques contraintes. Les deux scènes (SpirOps et Virtools) doivent refléter des configurations identiques. Il faut également déterminer à l'avance quelles informations envoyer (notamment depuis Virtools jusque SpirOps), ce qui conditionne le fonctionnement de l'architecture client/serveur.

2. Virtual Reality Peripheral Network

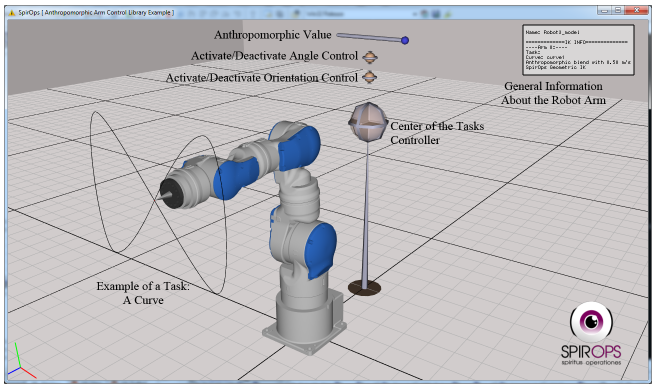


FIGURE 5.14 – L'environnement de la librairie SpirOps avec un robot suivant une trajectoire

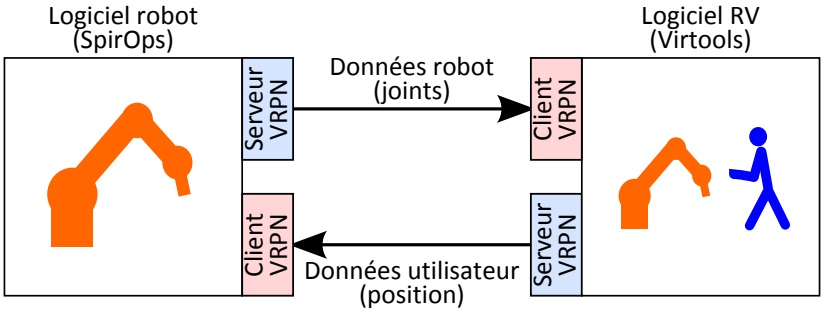


FIGURE 5.15 – L'architecture de communication entre le logiciel SpirOps et un logiciel de réalité virtuelle (les blocs de couleur correspondent aux apports de la thèse)

5.2 Cas d'étude en environnement réel

L'objectif des cas d'étude en environnement réel est de disposer d'une base pour la comparaison de situations réelles et virtuelles. Il n'a pas été envisagé de tester toutes les conditions en environnement réel, mais seulement celles qui paraissaient intéressantes pour notre étude et pertinentes aux yeux des opérateurs. Ainsi, seules les études sur la distribution spatiale de l'opérateur et du robot et sur la répartition des tâches ont été reproduites en environnements réel et virtuel : il paraissait intéressant de comparer les réactions des opérateurs dans ces deux situations.

Les études sur l'apparence et les mouvements des robots, menées en environnement virtuel, n'ont pas été reproduites en environnement réel. Ce choix a été fait pour des raisons principalement pratiques : il aurait fallu disposer de plusieurs robots et programmer différents profils de mouvements, ce qui n'était pas envisageable compte tenu des ressources disponibles. De plus, il s'agissait d'études sur la perception : les utilisateurs étaient globalement passifs lors de l'observation des robots et il ne semblait pas nécessaire de mener ces expérimentations en environnement réel.

Les cas d'étude en environnement réel ont été implémentés par PSA Peugeot Citroën (site de Vélizy), dans un espace physique dédié à la mise en place de cellules robotisées expérimentales (plateau NOVA, Nouvelles Voies d'Automatisation). Deux cellules ont été utilisées pour nos expérimentations (voir Figure 5.16). La première cellule concerne le montage de porte en coprésence avec un robot. Cette cellule était déjà présente au début de ces recherches. Elle a

été mise en place par PSA Peugeot Citroën, en collaboration avec MRK Systeme et Fraunhofer IPA. La deuxième cellule a été mise en place spécialement dans le cadre de nos travaux (au cours d'un stage) pour le cas d'étude sur le montage de raccords d'air en collaboration avec un robot bi-bras.

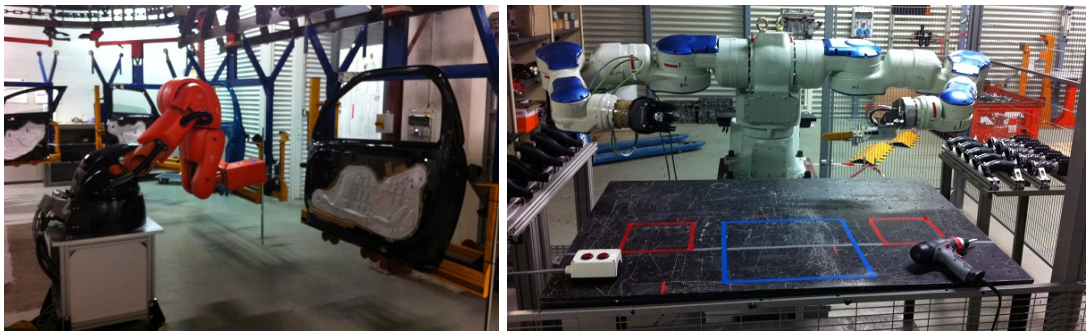


FIGURE 5.16 – Les deux cellules expérimentales mises en place en environnement réel

Puisque les cas d'étude en environnement réel ne se focalisaient pas sur la nature des mouvements des robots, aucun outil n'a été implémenté afin de contrôler les robots de manière biologique en situation réelle (comme cela a été le cas en situation virtuelle : capture de mouvements et intégration de modèles de mouvement humain). Les robots des cellules expérimentales provenaient de PSA Peugeot Citroën et étaient contrôlés de manière traditionnelle via les logiciels des constructeurs.

5.3 Evaluation de l'acceptabilité

Une fois les cas d'étude mis en place (en environnements virtuels et réels), il a fallu envisager quels outils utiliser pour évaluer l'acceptabilité au cours des expérimentations. Ces outils se basent sur l'utilisation de questionnaires pour recueillir les impressions des utilisateurs et sur l'utilisation de mesures physiologiques pour estimer leur état affectif.

5.3.1 Questionnaires

Afin de mettre en place des questionnaires pour nos cas d'étude, nous nous sommes inspirés de ceux issus de la littérature sur l'interaction homme-robot. Nous avons notamment considéré les questionnaires proposés par Bartneck *et al.* [Bartneck *et al.*, 2009] destinés à uniformiser les critères d'évaluation (les *Godspeed questionnaires*) et ceux de Shibata et Inooka [Shibata et Inooka, 1998] sur les mouvements des robots.

Cependant, l'ensemble de ces questionnaires propose des questions soit trop générales, soit trop focalisées sur des cas précis. Certains questionnaires se concentrent également sur des critères d'interaction sociale et ne considèrent pas des notions plus ergonomiques, liées à la distance au robot, à la répartition des tâches ou au contrôle du travail collaboratif. Pour chacun de nos cas d'étude, nous avons ainsi élaboré des questionnaires destinés à cibler des problématiques spécifiques : l'apparence des robots, les profils de mouvements des robots, le partage de l'espace en coprésence, la répartition des tâches en collaboration.

Pour les expérimentations sur la distribution spatiale et la distribution temporelle de l'opérateur et du robot, nous nous sommes inspirés des conseils de Bouletreau *et al.* [Bouletreau

et al., 1999] quant à la conception et la validation des questionnaires, avec la participation d'ergonomes de PSA Peugeot Citroën. Ces conseils mettent en avant la nécessité de bien formuler les questions par items, regroupés en plusieurs domaines qui ciblent des composantes différentes de l'étude. Le fait d'utiliser plusieurs items par domaines permet d'améliorer la cohérence interne du questionnaire. Les auteurs mettent également en garde contre certaines difficultés rencontrées lors de la conception d'un questionnaire : l'ordre des questions, l'attraction de la réponse positive (réponse suggérée dans la question), la longueur du questionnaire. Au final, le questionnaire établi doit être fiable (mesures reproductibles), valide (il mesure bien ce pour quoi il a été construit) et sensible au changement (il permet de rendre compte d'une modification même minime du phénomène exploré).

Chacun des questionnaires utilisés dans nos études est décrit en détail dans les parties correspondantes aux cas d'études et aux expérimentations (Chapitre 6 et Chapitre 7).

5.3.2 Mesures physiologiques

Dans nos expérimentations, les mesures physiologiques sont utilisées comme un moyen d'évaluation de l'acceptabilité. Dans le Chapitre 3, nous avons présenté les différentes mesures existantes dans la littérature pour recueillir les états physiologiques des personnes et comment les interpréter. Au regard de cet état de l'art, nous expliquons désormais les choix qui nous ont conduits à l'utilisation d'un système de mesures physiologiques pour nos études.

Pour nos études mettant en œuvre la collaboration entre des opérateurs et des robots, nous avons besoin de mesurer l'intensité de l'activité physique des opérateurs pendant la tâche ainsi que leur état de stress. L'objectif est de pouvoir comparer différentes situations et de déterminer lesquelles sont les plus acceptables. Au regard de la littérature existante, les indicateurs les plus utilisés pour estimer l'état affectif d'utilisateurs en interaction avec des robots sont le rythme cardiaque, la contraction des muscles faciaux et la conductance de la peau. Kulić et Croft [Kulić et Croft, 2007] ont cependant noté que la contraction des muscles corrugateurs des sourcils n'était pas un bon indicateur pour évaluer la valence des états affectifs.

De plus, il est important de choisir des capteurs qui puissent être portés par tous types d'utilisateurs, notamment par des opérateurs en situation de collaboration avec des robots. Les capteurs considérés doivent donc être le moins intrusifs possible (capteurs portables sans fil, sans gêne pour les mouvements) et facilement utilisables (à la fois en environnements réel et virtuel).

Compte tenu de ces considérations, nous avons choisi d'utiliser le système BioNomadix PPGED de Biopac (voir Figure 5.17). Ce système permet de mesurer le pouls de l'utilisateur, à l'aide d'un photo-pléthysmographe (PPG) à placer sur un doigt, et l'activité électro-dermale (EDA), à l'aide de deux électrodes à placer sur deux doigts différents. En mesurant le pouls, le PPG permet d'obtenir le rythme cardiaque de l'utilisateur. Le capteur EDA mesure la conductance de la peau (SCL) et permet de détecter les pics de conductance (SCRs). Ces capteurs sont reliés à un bracelet à porter au poignet, qui communique à distance en temps réel avec une unité d'acquisition MP150 reliée à un ordinateur (par éthernet) pour visualiser et enregistrer les données. L'unité d'acquisition MP150 permet également de recevoir des données de capteurs supplémentaires si besoin.

Le système est fourni avec le logiciel AcqKnowledge, qui permet d'enregistrer les données en temps réel, de les visualiser, de les annoter (placement d'événements) et de les analyser hors-ligne (voir Figure 5.18). Ce logiciel propose un ensemble de fonctionnalités de filtrage de données et de calculs mathématiques (moyenne, écart-type, minimum, maximum). Les données récoltées peuvent ensuite être exportées vers des applications externes (Excel, R) pour une analyse statistique plus poussée entre utilisateurs (normalisation, comparaison).

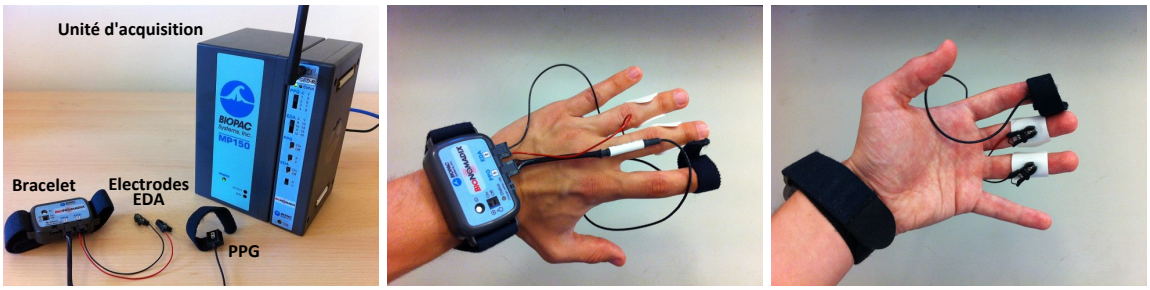


FIGURE 5.17 – Le système Biopac (BioNomadix PPGED) utilisé pour acquérir le rythme cardiaque et la conductance de la peau et le placement sur la main d'un utilisateur

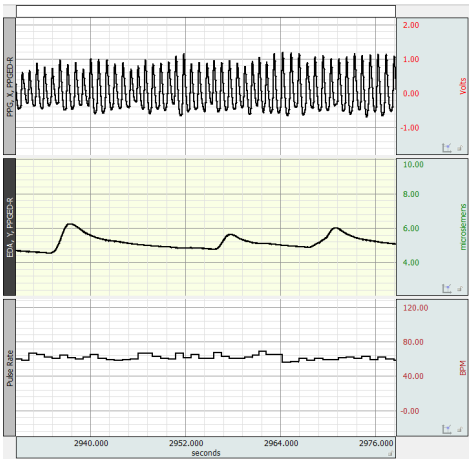


FIGURE 5.18 – Le logiciel AcqKnowledge permettant d'enregistrer et d'analyser les mesures physiologiques : le signal PPG en haut, le signal EDA au milieu avec certains pics de conductance et le rythme cardiaque en bas (calculé directement à partir du PPG)

Dans nos études, nous nous sommes focalisés sur la comparaison des états affectifs des opérateurs entre différentes situations de collaboration. Il n'était pas nécessaire d'estimer les états affectifs à un niveau absolu et de les catégoriser sur des systèmes d'échelle tels que celle de valence-arousal. Nous nous sommes donc concentrés sur l'interprétation des données brutes (moyennées et normalisées par utilisateur) provenant des mesures physiologiques du système Biopac (rythme cardiaque, conductance de la peau). Une interprétation plus haut niveau des données pourrait cependant apporter des perspectives intéressantes, notamment en termes de contrôle et d'adaptation du comportement des robots, mais ces problématiques sortent de notre cadre d'étude.

5.4 Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons décrit les outils que nous avons utilisés pour mettre en place nos cas d'étude et mener nos expérimentations.

Dans un premier temps, nous avons dû mettre en place un environnement de simulation immersif (stéréoscopie, suivi de point de vue, échelle 1). Nous avons choisi d'utiliser le logiciel de réalité virtuelle Virtools, compatible entre les installations de MINES ParisTech et de PSA

Peugeot Citroën. Pour mettre en place nos cas d'étude, nous avons eu besoin de contrôler des robots en environnement virtuel. Nous étions notamment intéressés par contrôler ces robots de manière biologique. Pour y parvenir, nous avons envisagé deux solutions. La première solution a permis d'intégrer des algorithmes de cinématique inverse dans notre logiciel de réalité virtuelle et de contrôler des robots de manière simple via des trajectoires prédéfinies ou de la capture de mouvements. La deuxième solution s'est focalisée sur l'implémentation et l'intégration sur des robots de critères du mouvement basés sur des modèles du mouvement humain : aspects souples de la base et de l'effecteur, profil de vitesse anthropomorphe. Cette deuxième solution a permis de mener des expérimentations plus fines sur la perception des mouvements des robots.

Une partie des expérimentations a également été menée en environnement réel grâce à des cellules robotisées expérimentales de PSA Peugeot Citroën. L'une de ces cellules était déjà disponible au début de ces recherches, tandis qu'une deuxième a été conçue spécialement dans le cadre de ces travaux. PSA Peugeot Citroën s'est chargé de la mise en place de ces cellules expérimentales.

Enfin, il a fallu considérer des outils pour l'évaluation de l'acceptabilité. L'utilisation de questionnaires, spécifiques à chaque cas d'étude, est décrite dans les chapitres suivants. Concernant l'utilisation de mesures physiologiques, en considérant les mesures employées dans la littérature, nous avons choisi d'utiliser les indicateurs liés au rythme cardiaque et à la conductance de la peau des utilisateurs. Il était également nécessaire d'utiliser des capteurs peu intrusifs et utilisables dans des situations diverses (environnements réel et virtuel, situations de travail). Ces considérations ont conduit à l'achat et à l'utilisation d'un système de mesures physiologiques particulier. Pour nos études, nous nous focalisons sur la comparaison d'états affectifs entre plusieurs situations : nous nous contentons d'analyser et d'interpréter les données brutes des mesures physiologiques (sans interprétation haut niveau) et d'en tirer des indicateurs de l'acceptabilité des différentes situations.

L'ensemble de ces outils a été utilisé pour mettre en place nos expérimentations. Le Chapitre 6 se focalise sur des situations de coprésence homme-robot avec des expérimentations sur la distribution spatiale et les mouvements des robots. Le Chapitre 7 se concentre sur des situations de collaboration homme-robot avec des études sur l'apparence et les mouvements des robots et sur la répartition des tâches entre homme et robot.

Chapitre 6

Etude de la coprésence homme-robot

Dans ce chapitre, nous présentons le premier cas d'étude abordé dans nos travaux. Il s'agit d'une situation de coprésence entre un opérateur et un robot sur les chaînes de montage de portes automobiles. Nous commençons par présenter ce cas d'étude de manière générale. Puis nous exposons deux expérimentations qui ont été menées sur ce cas d'étude. La première expérimentation traite de la distribution spatiale entre l'opérateur et le robot et a été menée en environnements réel et virtuel. La deuxième expérimentation s'intéresse aux caractéristiques du mouvement des robots et a été menée en environnement virtuel.

6.1 Cas d'étude

Lorsque l'on étudie la collaboration homme-robot, une étape importante à considérer est celle du partage d'espace. En effet, avant de pouvoir travailler main dans la main, l'homme et le robot doivent d'abord apprendre à partager le même espace physique. C'est pourquoi, avant de considérer les situations de collaboration homme-robot, il est important d'aborder des situations de coprésence. Ces situations représentent un niveau bas d'interaction, où l'homme et le robot sont simplement situés dans le même espace sans nécessairement travailler sur des tâches communes, mais qu'il est important de considérer dans l'étude de l'acceptabilité.

En usine automobile, les lignes d'assemblage représentent un exemple idéal de situations de coprésence. Les pièces (portes, voitures) défilent devant les opérateurs, qui doivent travailler côte à côte et se partager l'espace selon des pas de travail (voir Figure 6.1). Ces pas sont fixes et sont délimités au sol : ils représentent des portions de chaîne de montage d'environ 4 mètres de long. Un pas de travail correspond à un poste de montage : les opérateurs doivent finaliser leurs tâches à l'intérieur de leur pas de travail. Les opérateurs peuvent déborder sur le pas suivant pour rattraper un retard éventuel : ils cohabitent alors avec leur coéquipier dans la même zone. Si le retard est trop important, ils doivent demander l'arrêt de la ligne. Sur ces postes, les opérateurs sont donc situés côte à côte, sont conscients de la présence des autres et doivent s'adapter aux avancées ou aux retards de leurs coéquipiers.

Pour soulager les opérateurs et les aider dans certaines tâches, il peut être envisagé d'introduire des robots sur les chaînes de montage (voir Figure 6.1) : il est alors nécessaire de leur attribuer un pas de travail (auquel cas le robot remplace un opérateur) ou de les intercaler entre deux pas existants (les deux postes correspondants sont préservés mais les pas se chevauchent). Ces configurations, nouvelles pour les opérateurs, peuvent cependant apporter des contraintes supplémentaires si le robot ne réagit pas comme un véritable partenaire de travail : il n'a pas forcément conscience de l'avancée des opérateurs et ne s'adapte pas aussi bien qu'un opérateur.

Ceci en fait une situation intéressante pour l'étude de l'acceptabilité.

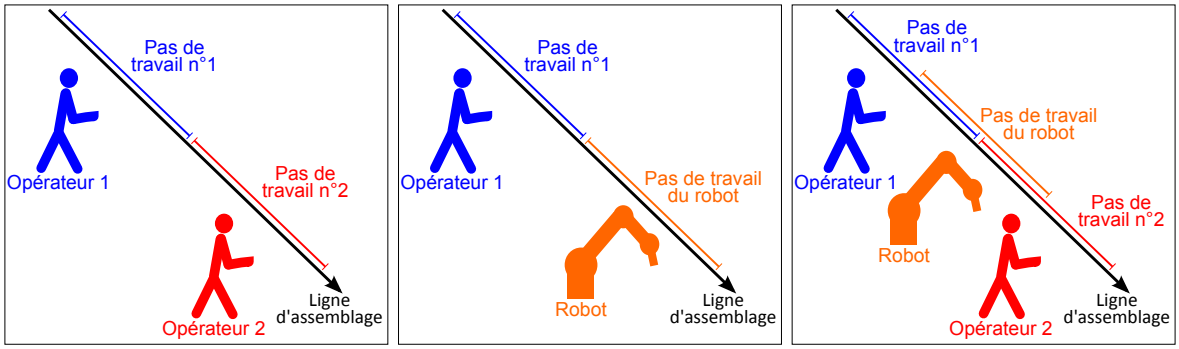


FIGURE 6.1 – Différentes configurations de pas de travail sur une ligne d'assemblage entre des opérateurs et un robot

Le premier cas d'étude envisagé dans nos travaux représente une situation de coprésence entre un opérateur et un robot. Il s'inspire d'un poste de travail réel sur les chaînes de montage de PSA Peugeot Citroën : la pose d'une feuille d'étanchéité sur les portes de voitures. Sur les postes actuels, cette opération est entièrement manuelle (voir Figure 6.2). L'opérateur doit poser une feuille d'étanchéité sur la porte, attraper un gabarit métallique (situé en hauteur), le fixer sur la porte et passer une roulette sur les contours de la feuille pour écraser un cordon de colle (et ainsi fixer définitivement la feuille). Cette opération manuelle possède quelques inconvénients. Premièrement, l'opération est physiquement éprouvante pour les opérateurs : pour les attraper en hauteur, les gabarits nécessitent des postures pénibles et le passage de la roulette entraîne des mouvements contraignants du poignet. Deuxièmement, la qualité de la fixation de la feuille n'est pas garantie au cours de cette opération manuelle.

FIGURE 6.2 – Le poste actuel en usine automobile : la pose de feuille d'étanchéité et le passage de la roulette avec un gabarit

Pour soulager les opérateurs, les roboticiens et les ergonomes de PSA Peugeot Citroën ont envisagé d'utiliser un robot effectuant la tâche du passage de la roulette. Dans ce nouveau poste, l'opérateur et le robot sont côte à côte : l'opérateur pose la feuille, puis le robot vient passer la roulette, située à l'extrêmité de son effecteur, sur les contours de la feuille. L'opérateur peut effectuer d'autres tâches sur la porte à proximité du robot (voir Figure 6.3).

Une cellule expérimentale a été mise en place par PSA Peugeot Citroën (en collaboration avec MRK Systeme et Fraunhofer IPA) pour tester ce cas d'étude. Elle est composée d'un défilé

FIGURE 6.3 – Le poste de pose de feuille d'étanchéité en coprésence avec un robot (cellule expérimentale)

de quatre portes positionnées sur des balancelles (voir Figure 6.4). Pour des raisons pratiques, le défilé s'effectue en boucle (la plus grande longueur rectiligne mesure environ 6,4 mètres). Une fois le mécanisme lancé, les portes reviennent à leur position initiale au bout de 7 minutes environ (dépendant de la vitesse de défilé). Un laser est situé en hauteur au-dessus du robot (légèrement en retrait) afin de détecter l'arrivée d'une nouvelle porte dans la zone de travail du robot. Un signal indique alors au robot de se préparer à effectuer sa tâche (position de préparation face à la porte). Une fois le robot en préparation, un deuxième laser (situé dans la tête du robot, à côté de la roulette) permet de détecter la présence et les contours de la feuille. La roulette est ensuite déployée et le robot effectue le contour de la feuille via des trajectoires apprises qu'il corrige en temps réel en fonction des informations des lasers.

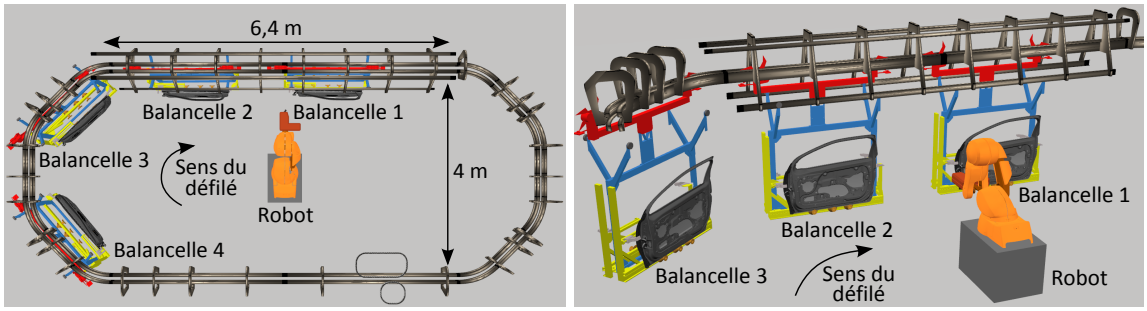


FIGURE 6.4 – La configuration de la cellule expérimentale mise en place par PSA Peugeot Citroën

Afin de pouvoir travailler à côté des opérateurs sans danger, le robot choisi pour effectuer la tâche sur la feuille étanchéité est intrinsèquement sécurisé et sans danger. Il s'agit du robot Kuka KR5SI, un robot industriel traditionnel (Kuka KR5) enveloppé de mousses protectrices intégrant des capteurs capacitifs et tactiles (voir Figure 6.5). L'ensemble de ces capteurs, développés par MRK Systeme, permet de rendre le robot sécurisé et de détecter la présence d'opérateurs à proximité. Les capteurs capacitifs permettent de détecter une proximité humaine entre 0 et 30 cm, tandis que les capteurs tactiles détectent les contacts et les collisions fortes. Un signal sonore est émis tant qu'une proximité est détectée autour du robot. Si le robot travaille sur une porte et qu'une proximité est détectée, le robot s'arrête provisoirement et s'écarte de la porte : les balancelles continuent de défiler et le robot reprend son travail une fois sa zone de détection libérée. Une collision forte (détectée par les capteurs tactiles) entraîne un arrêt d'urgence de la

cellule (arrêt complet du robot et du défilé des portes).

FIGURE 6.5 – La zone de détection autour du robot et l'arrêt instantané du robot lors d'une collision avec un opérateur

Pour le moment, la sécurité du poste est embarquée entièrement sur le robot à l'aide des capteurs capacitifs et tactiles. Il est envisagé d'intégrer des dispositifs de sécurité externe, tels que des caméras couleur et de profondeur, afin d'obtenir des informations sur l'environnement du robot (position relative des opérateurs, reconnaissance de gestes, détection d'événements imprévus). Ces dispositifs permettront de rendre le système de collaboration plus sécurisé mais également plus intuitif pour l'opérateur : en reconnaissant les gestes de l'opérateur, le robot pourra adapter son comportement et commencer ou arrêter son travail au moment opportun. Ces problématiques sont traitées dans un axe de recherche spécifique de la chaire « PSA Peugeot Citroën - Robotique et Réalité Virtuelle ».

Dans l'optique de procéder à des tests à la fois en environnement réel et en environnement virtuel, la cellule expérimentale de montage de porte a entièrement été reproduite par PSA Peugeot Citroën dans le logiciel de réalité virtuelle Virtools (voir Figure 6.6). Cet environnement a servi de base pour la mise en place des expérimentations présentées dans la suite.

FIGURE 6.6 – La reproduction de la cellule expérimentale en environnement virtuel

6.2 Etude de la distribution spatiale

La première expérimentation menée sur ce cas d'étude s'est intéressée à la distribution spatiale de l'opérateur et du robot en situation de coprésence, c'est-à-dire la manière dont l'opérateur et le robot se partagent l'espace de travail. Il s'agissait notamment de comparer des situations

de travail à des distances plus ou moins proches du robot. Cette expérimentation a eu lieu à la fois en environnements réel et virtuel.

Les résultats de cette expérimentation ont fait l'objet d'une publication et d'une présentation à la conférence IEEE ROMAN (Robot and Human Interactive Communication) en août 2014 à Edimbourg [Weistroffer *et al.*, 2014].

6.2.1 Scénario

Le cas d'étude considéré dans cette expérimentation (pose de la feuille d'étanchéité en coprésence avec un robot) n'existe pas encore en usine. Afin d'élaborer une série d'opérations à réaliser sur la porte (appelée gamme de montage) qui autorise la coprésence homme-robot et qui garantisse le temps de cycle du poste, des observations ont été effectuées sur les chaînes de montage du site de Poissy. Par rapport à la situation manuelle en usine, le roulage de la feuille d'étanchéité effectué par le robot est plus lent. Pour tenir le temps de cycle des lignes d'assemblage, il est donc nécessaire qu'un opérateur vienne assembler des pièces sur la porte pendant la tâche du robot, à une distance rapprochée. Il a ainsi fallu adapter les opérations actuellement effectuées sur les lignes d'assemblage et élaborer une gamme de montage dans laquelle un opérateur et un robot puissent travailler côte à côte sur la même porte. Ce travail a été confié à un stagiaire ergonome dans le cadre de la chaire.

Les différentes opérations de la gamme de montage sont détaillées sur la Figure 6.7. Globalement, l'opérateur doit effectuer des tâches sur la porte en amont du robot. L'ordre des opérations sur la porte a été défini en fonction du sens de défilement des portes (de gauche à droite quand l'opérateur est face aux portes) et de la position du robot (à droite de l'opérateur). Ainsi, les premières opérations sont effectuées sur la droite de la porte, puis la feuille est posée (opération nécessaire pour que le robot puisse commencer à travailler) et les dernières opérations sont réalisées sur la gauche de la porte. L'opérateur peut ainsi effectuer chaque tâche en restant toujours du même côté du robot. Le nombre d'opérations à effectuer a également été défini de telle sorte à remplir le temps disponible d'un pas de travail standard, soit environ 40 secondes (le pas de travail s'étend sur une distance d'environ 1,80 mètres).

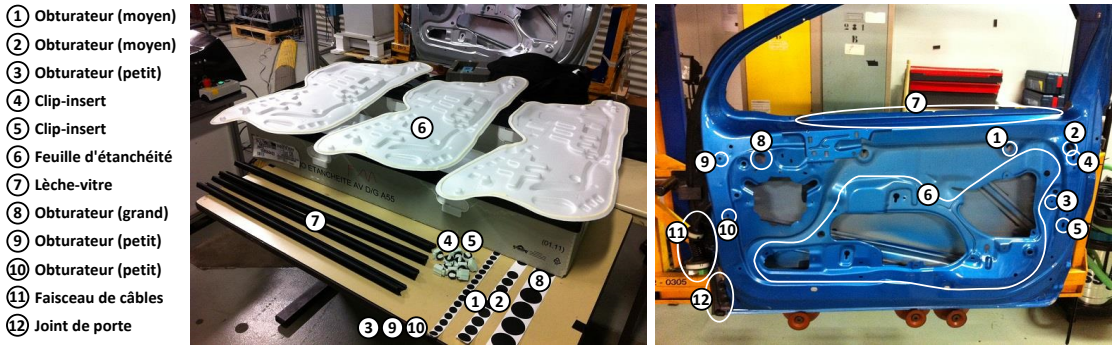


FIGURE 6.7 – L'ordre des opérations à effectuer, les pièces correspondantes et leur emplacement sur la porte

Deux configurations de coprésence ont été envisagées pour effectuer les opérations, avec deux positions différentes du pas de travail (voir Figure 6.8) : l'une où le pas de l'opérateur est éloigné de celui du robot (C_e, configuration éloignée) et l'autre où les pas se chevauchent (C_p, configuration proche). Dans la première configuration, l'opérateur a le temps de terminer la totalité des opérations avant que le robot ne commence à travailler sur la porte. Dans la

deuxième configuration, le poste de travail est décalé vers le robot : l'opérateur doit effectuer les dernières tâches alors que le robot se prépare et commence à travailler sur la feuille. Le décalage du poste dans la deuxième configuration a été ajusté de telle sorte à faire survenir des interactions entre l'opérateur et le robot (contact, arrêt du robot).

Les pas de travail (configurations proche et éloignée) étaient affichés au sol. Les coordinateurs indiquaient oralement aux opérateurs quand ils pouvaient commencer les opérations (début du pas) et quand ils devaient abandonner la porte courante pour passer à la porte suivante (fin du pas). Aucun dépassement du pas de travail (essentiellement en situation éloignée) n'était toléré : si les opérateurs prenaient du retard, ils devaient s'arrêter à la fin du poste même si la porte courante n'était pas terminée (et reposer les pièces restantes si nécessaire) et passer à la porte suivante.

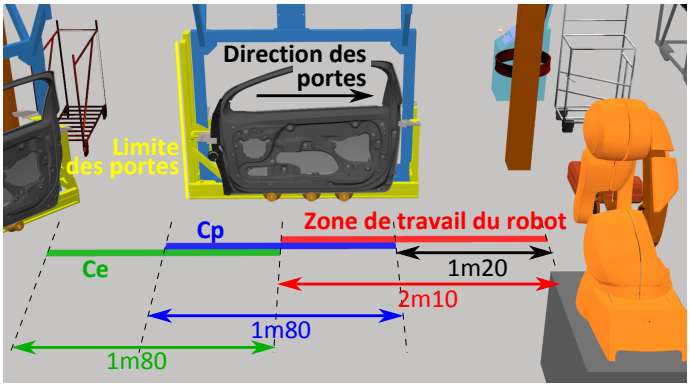


FIGURE 6.8 – Les deux configurations de coprésence évaluées au cours des tests : éloignée C_e et proche C_p

6.2.2 Implémentation

6.2.2.1 Environnement réel

Le scénario a été mis en place en situation réelle (S_r) de manière à reproduire fidèlement une situation d'usine. La chaîne de montage et le robot étaient déjà fonctionnels avant le début de cette étude. Des pièces de montage ont été commandées spécifiquement pour l'étude et quatre portes (modèle avant-droit de Citroën DS3) ont été installées sur les balancelles. L'opérateur pouvait s'approvisionner en pièces sur une table située derrière lui, à côté du robot (voir Figure 6.9). La vitesse des balancelles était la même qu'en usine : environ 0,07 m/s (soit 40 véhicules par heure).

Quelques différences par rapport à la situation en usine étaient cependant présentes. La conception initiale du prototype de la chaîne de montage ne permettait qu'un sens de défilement des portes inverse à celui en usine (site de Poissy). Compte tenu de cette limitation et de la présence du robot, l'ordre des opérations sur les portes était ainsi différent de celui effectué en usine : il s'agissait d'une nouvelle gamme de montage en coprésence avec un robot. Par rapport aux lignes d'assemblage en usine, les opérateurs devaient également gérer la présence du robot à leurs côtés, ce qui était le but de l'étude. L'ensemble de ces limitations a été réduit en procédant à des phases d'entraînement avec les opérateurs avant chaque test.

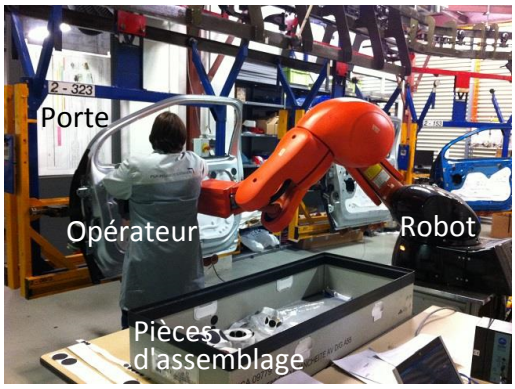


FIGURE 6.9 – Un opérateur dans l'environnement réel

6.2.2.2 Environnement virtuel

Le scénario a également été mis en place en situation virtuelle (S_v) de manière aussi fidèle que possible à la situation réelle. Les modèles 3D de la cellule et du robot étaient déjà disponibles chez PSA Peugeot Citroën et les modèles 3D des pièces de montage et des portes ont été récupérés spécialement pour l'expérimentation. Le modèle numérique de la cellule était entièrement statique et il a fallu y implémenter le scénario de montage de porte : comportement du robot, interaction avec les pièces de montage, mouvement des balancelles. Pour des raisons pratiques, une desserte virtuelle a été ajoutée pour suivre le mouvement des portes et approvisionner l'opérateur en pièces.

Pour cette expérimentation, il n'était pas envisagé d'étudier l'anthropomorphisme des mouvements du robot. Les mouvements du robot pouvaient ainsi être contrôlés de manière simple par les algorithmes de cinématique inverse décrits dans la Section 5.1.3 du Chapitre 5. L'effecteur du robot suivait un repère 3D dans l'espace. Ce repère 3D reproduisait les mêmes trajectoires que dans l'environnement réel : déplacement vers la position de préparation, parcours du contour de la feuille d'étanchéité, recul lors de la proximité de l'opérateur, retour en position d'attente. Le comportement du robot virtuel était donc fidèle à celui de la situation réelle.

Le scénario de montage a été prototypé dans la salle immersive de l'école des Mines, mais l'ensemble des tests s'est effectué dans l'Holospace (CAVE 3 faces) de PSA Peugeot Citroën. Cette installation a l'avantage d'avoir une configuration en longueur (voir Figure 6.10) : elle dispose d'un écran frontal de 4 mètres de long, d'un écran au sol et d'un écran sur le côté droit (2,5 mètres de large). L'écran frontal se prêtait très bien à des simulations de chaîne de montage (les opérateurs commençaient sur le côté gauche et se déplaçaient sur la droite au fur et à mesure de l'avancée des portes), tandis que l'écran de droite permettait de visualiser le robot.

Les opérateurs étaient munis de lunettes permettant de visualiser l'environnement en relief (stéréoscopie active). Un système de caméras infrarouge ARTrack permettait de suivre la position et l'orientation de plusieurs capteurs dans l'espace : un capteur situé sur les lunettes permettait de suivre le point de vue des opérateurs, deux autres capteurs permettaient de repérer les positions des mains (nécessaire pour interagir avec les pièces virtuelles) et deux autres capteurs étaient placés de chaque côté du bas du dos (à l'aide d'une ceinture). Ce sont ces capteurs qui permettaient de repérer la position de l'opérateur relativement au robot : à chaque fois qu'un de ces capteurs entrait dans une enveloppe virtuelle de 15 cm autour du robot, un signal sonore était émis et le robot s'arrêtait dans sa tâche, de la même manière que dans l'environnement réel.

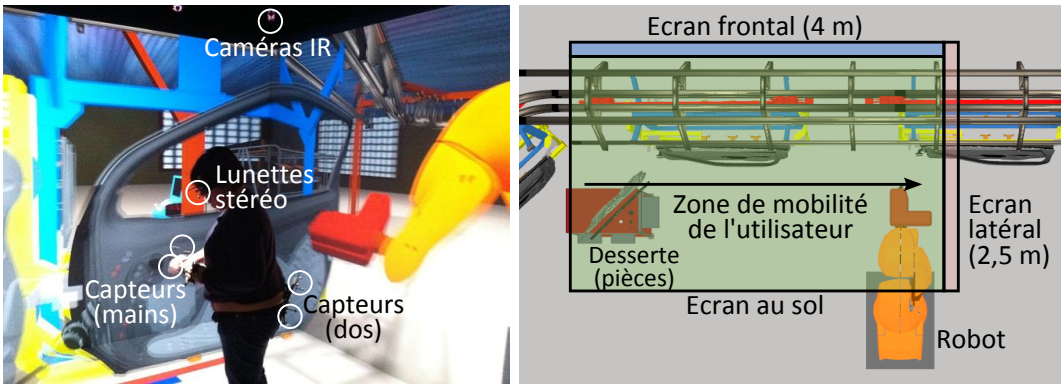


FIGURE 6.10 – Un opérateur dans l'environnement virtuel et la configuration de l'Holospace vue de haut

L'ensemble de la simulation était co-localisé et à échelle 1 : les avatars des mains des opérateurs étaient co-localisés avec leurs mains réelles. Les opérateurs pouvaient attraper des pièces en approchant leurs mains virtuelles (détection de collision entre la pièce et la main) et pouvaient les placer sur la porte de la même façon (détection de collision entre la pièce et l'emplacement adéquat). Des indications visuelles (indices transparents rouges) permettaient aux opérateurs de savoir comment prendre les pièces et où les poser. Les petites pièces pouvaient être prises à une main (main gauche ou main droite), tandis que la feuille d'étanchéité et le lèche-vitre devaient être pris à deux mains (endroits spécifiques indiqués sur les pièces). Les pas de travail étaient indiqués au sol (virtuel). Les signaux de début et de fin de pas étaient indiqués de manière sonore et confirmés oralement par les coordinateurs des tests. Aucune pièce ne pouvait être posée avant le début du pas et toutes les pièces non posées avant la fin du pas étaient automatiquement mises de côté.

Il a fallu tenir compte de certains biais sensori-moteurs liés à l'environnement virtuel. D'une part, au niveau visuel, il aurait été impossible de mener ces tests dans la salle immersive de l'école des Mines (un seul écran rétroprojeté) : il était impossible de visualiser l'environnement dans sa totalité (il aurait fallu pouvoir se déplacer dans l'environnement virtuel, ce qui aurait ajouté des contraintes supplémentaires pour les tests). C'est pourquoi l'Holospace de PSA Peugeot Citroën a été choisi pour mener les tests : sa configuration est idéale pour une simulation de chaîne de montage. Des limitations sont cependant toujours présentes : la vision stéréoscopique peut engendrer de la fatigue visuelle et les lunettes portées par les utilisateurs réduisent leur champ de vision, notamment en vision périphérique.

Au niveau des opérations virtuelles, aucun système à retour d'effort n'a été utilisé. Il aurait pu être envisagé de manipuler de véritables pièces de montage (suivies dans l'environnement virtuel), mais cette configuration était complexe à mettre en place : les pièces étaient entreposées sur une desserte, prises par les opérateurs puis montées directement sur la porte virtuelle. Les opérateurs avaient uniquement un retour visuel pour s'assurer que les pièces étaient bien montées sur la porte, sans retour haptique. Les opérateurs avaient également uniquement des retours visuel et sonore pour avoir conscience de la proximité du robot. Pour réduire les biais liés à la difficulté de montage des pièces, les opérations virtuelles étaient donc simplifiées et la vitesse du défilé des portes pouvait être adaptée en fonction de la performance des opérateurs.

6.2.3 Tests utilisateurs

Des tests utilisateurs ont été menés avec des opérateurs de PSA Peugeot Citroën. L'objectif des tests était de comparer les deux configurations de coprésence avec le robot (éloignée C_e ou proche C_p) et les deux situations d'expérimentation (réelle S_r et virtuelle S_v). La finalité des tests était de recueillir les ressentis des opérateurs en termes d'acceptabilité.

6.2.3.1 Population

Des pré-tests ont été menés avec deux personnes du pôle robotique de PSA Peugeot Citroën. Les ergonomes de PSA Peugeot Citroën se sont ensuite chargés de présenter le principe des expérimentations à des secteurs de montage de l'usine du site de Poissy. Huit opérateurs se sont portés volontaires pour participer aux tests. Ces opérateurs possédaient une forte expérience des postes de montage : la plupart d'entre eux étaient des moniteurs (opérateur pouvant remplacer ou aider à n'importe quel poste sur les chaînes de montage).

6.2.3.2 Protocole

La durée des tests était d'une journée entière par opérateur. Au début de chaque journée, les problématiques de la chaire et les enjeux des tests étaient présentés aux opérateurs : enjeux de la collaboration homme-robot pour l'ergonomie et la santé des opérateurs, nécessité d'étudier l'acceptabilité de ces nouveaux postes. Le poste de feuille d'étanchéité en coprésence avec un robot leur était ensuite décrit, ainsi que les opérations à effectuer. Il leur était bien indiqué que les tests ne se focalisaient pas sur la performance et l'efficacité des opérations, mais sur l'acceptabilité du poste et la relation avec le robot. Ainsi, il était demandé aux opérateurs de faire du mieux qu'ils le pouvaient au cours des tests (maintien du temps de cycle, qualité des opérations), mais que des opérations oubliées ou trop longues n'avaient pas d'impacts majeurs sur les tests. Cette mise en situation avait également pour but de décontracter les opérateurs.

La journée de tests était divisée en deux demi-journées : l'une consacrée à la situation réelle et l'autre à la situation virtuelle (voir Tableau 6.1). La moitié des opérateurs passait d'abord en situation virtuelle (matin) puis en situation réelle (après-midi), tandis que l'autre moitié des opérateurs procédait dans l'ordre inverse.

Chaque demi-journée débutait par une session d'introduction avec l'environnement (réel ou virtuel). Pour chaque environnement, la gamme des opérations à effectuer était proposée aux opérateurs et ceux-ci avaient autant de temps qu'ils le désiraient pour s'entraîner sur une porte en configuration statique (pas de mouvement des portes, pas d'interaction avec le robot). Une fois prêt, un tour à vide du défilé des portes était effectué afin d'observer la tâche du robot et comprendre son comportement lorsqu'il détectait une personne à proximité. Puis les tests commençaient.

Les tests étaient organisés autour des deux configurations C_e (éloignée) et C_p (proche). Pour chaque configuration, les opérateurs devaient effectuer 4 cycles de 4 portes chacun (une boucle du défilé contient 4 portes), pour un montage de 16 portes au total. L'ordre de passage des configurations de coprésence (éloignée ou proche) était randomisé : les opérateurs testaient soit d'abord en situation éloignée puis en situation proche, soit en situation proche puis éloignée (voir Tableau 6.1).

Situation	Virtuelle Sv (matin)				Réelle Sr (après-midi)				
Etape	Entraîn.	Test 1	Test 2	Quest. Qs	Entraîn.	Test 1	Test 2	Quest. Qs	Quest. Qo
Configuration	Statique	Cp	Ce		Statique	Ce	Cp		

	Test (Ce ou Cp)					
Etape	Repos	Cycle 1 (4 portes)	Cycle 2 (4 portes)	Cycle 3 (4 portes)	Cycle 4 (4 portes)	Quest. Qc
Mesures physio.	Φ0	Φ1	Φ2	Φ3	Φ4	

TABLE 6.1 – Un exemple de déroulement des tests pour un opérateur

6.2.3.3 Mesures

Afin d'évaluer l'acceptabilité des différentes configurations de coprésence (éloignée ou proche, en situation réelle ou virtuelle), plusieurs mesures étaient recueillies au cours des tests.

Un questionnaire Q_c (questionnaire sur la coprésence) était posé à l'issue de chaque condition (S_rC_e, S_rC_p, S_vC_e, S_vC_p) afin d'évaluer les impressions des opérateurs sur la distribution spatiale du poste et la distance au robot. Un deuxième questionnaire Q_s était posé à l'issue de chaque demi-journée afin d'obtenir des impressions plus générales sur les situations d'expérimentation (S_r, S_v) et de comparer les situations réelle et virtuelle. Des questions ouvertes (questionnaire Q_o) étaient également posées à l'issue de la journée entière. L'ensemble des questionnaires a été établi avec la participation des ergonomes de PSA Peugeot Citroën et le stagiaire ergonome rattaché à la chaire, en suivant les conseils de Bouletreau *et al.* [Bouletreau *et al.*, 1999]. Les questionnaires regroupaient plusieurs questions qui ciblaient différents thèmes principaux : l'utilisabilité, l'utilité, la sécurité, l'efficacité, l'impression générale et l'acceptabilité.

Des mesures physiologiques étaient recueillies à chaque fois que les opérateurs étaient au repos (au début de chaque condition et à l'issue de chaque cycle, voir Tableau 6.1) afin d'évaluer leur état affectif.

Enfin, des mesures liées à la performance de la tâche (temps de complétion, opérations non effectuées) étaient récoltées tout au long des tests.

Les procédures d'acquisition et les résultats liés à chaque mesure (questionnaires, mesures physiologiques, performance) sont présentés en détail dans la suite.

6.2.4 Résultats du questionnaire sur la coprésence

Le questionnaire Q_c (voir Tableau 6.2) était posé à l'issue de chaque condition des tests (S_rC_e, S_rC_p, S_vC_e, S_vC_p) pour évaluer les impressions des opérateurs sur la configuration de travail et la coprésence avec le robot. Le questionnaire comprenait 13 questions qui étaient liées à cinq thèmes principaux : l'utilisabilité (4 questions), la sécurité (4 questions), la compétence du robot (3 questions), l'impression (1 question) et l'acceptabilité (1 question).

Les réponses aux questions s'effectuaient sur une échelle à 6 points, les notes 1 et 6 correspondant à deux extrêmes indiqués sur le questionnaire. Une échelle à 6 points a été choisie pour éviter les réponses neutres. Les thèmes des questions n'étaient pas indiqués aux opérateurs.

Dans un premier temps, les résultats globaux sont présentés (questions regroupées par thèmes principaux), puis chaque thème est analysé en détail. Pour chaque thème et chaque question du questionnaire, des tests statistiques ont été menés pour déceler les différences significatives

Thèmes	Questions	Réponses		
Utilisabilité	Vous avez eu l'impression de contrôler le travail avec le robot	Non	1 2 3 4 5 6	Oui
	Le robot s'est adapté à votre travail	Non	1 2 3 4 5 6	Oui
	Vous avez dû vous adapter au robot*	Non	1 2 3 4 5 6	Oui
	Le robot vous a contraint dans votre travail*	Non	1 2 3 4 5 6	Oui
Sécurité	En présence du robot, vous vous sentiez	En insécurité	1 2 3 4 5 6	En sécurité
	En présence du robot, vous vous sentiez	Anxieux	1 2 3 4 5 6	Décontracté
	La distance de sécurité avec le robot était adaptée	Non	1 2 3 4 5 6	Oui
	La vitesse du robot était adaptée et sécurisante	Non	1 2 3 4 5 6	Oui
Compétence du robot	Le robot vous a semblé plutôt	Incompétent	1 2 3 4 5 6	Compétent
	Le robot vous a semblé plutôt	Inefficace	1 2 3 4 5 6	Efficace
	Le robot vous a semblé plutôt	Inutile	1 2 3 4 5 6	Utile
Impression	L'interaction avec le robot vous a semblé	Désagréable	1 2 3 4 5 6	Agréable
Acceptabilité	La collaboration avec le robot était acceptable	Non	1 2 3 4 5 6	Oui

*échelle inversée

TABLE 6.2 – Le questionnaire Q_c sur la coprésence

dans les réponses (tests de Friedman et de Wilcoxon). Les résultats des tests statistiques sont disponibles en Annexe B.

6.2.4.1 Résultats globaux

Les résultats globaux du questionnaire Q_c (moyennes des résultats regroupés par thèmes) sont représentés sur la Figure 6.11.

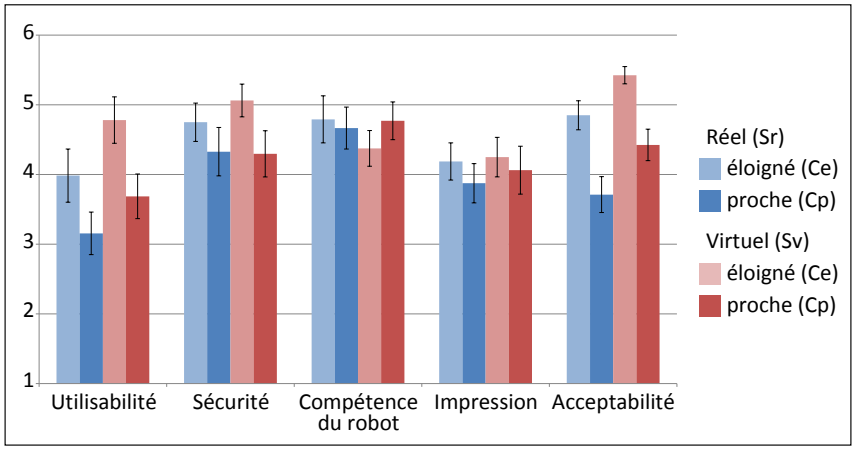


FIGURE 6.11 – Les résultats du questionnaire Q_c sur la coprésence regroupés par thèmes

Des différences significatives ont été décelées pour l'utilisabilité ($p < 10^{-3}$), la sécurité ($p = 0{,}03$) et l'acceptabilité ($p = 0{,}002$). Aucune différence significative n'a été décelée pour l'impression et une faible différence pour la compétence du robot (seulement entre S_rC_e et S_vC_e). Ceci montre que les thèmes qui étaient les plus sensibles du point de vue des opérateurs étaient l'utilisabilité et l'acceptabilité, puis la sécurité (différences significatives plus faibles) et enfin la compétence du robot.

Les résultats sur l'utilisabilité, la sécurité et l'acceptabilité montrent deux aspects importants. D'une part, la configuration proche du robot (C_p) a toujours été perçue moins utilisable, moins sécurisée et moins acceptable que la configuration éloignée (C_e). D'autre part, cette différence entre configurations a été observée à la fois en situation réelle et en situation virtuelle :

des différences significatives ont été décelées entre les deux configurations dans chaque situation (exceptée pour la sécurité en situation réelle). Ceci montre que les opérateurs étaient sensibles aux différences entre configurations, que ce soit en situation réelle ou virtuelle. Enfin, on peut noter que les résultats en situation virtuelle sont légèrement plus hauts que ceux en situation réelle (surtout pour l'utilisabilité et l'acceptabilité) : la situation virtuelle a souvent été perçue comme plus simple et moins contraignante à réaliser.

Dans la suite, nous analysons en détail chacun des cinq thèmes du questionnaire.

6.2.4.2 Utilisabilité

Les résultats des questions liées à l'utilisabilité sont représentés sur la Figure 6.12.

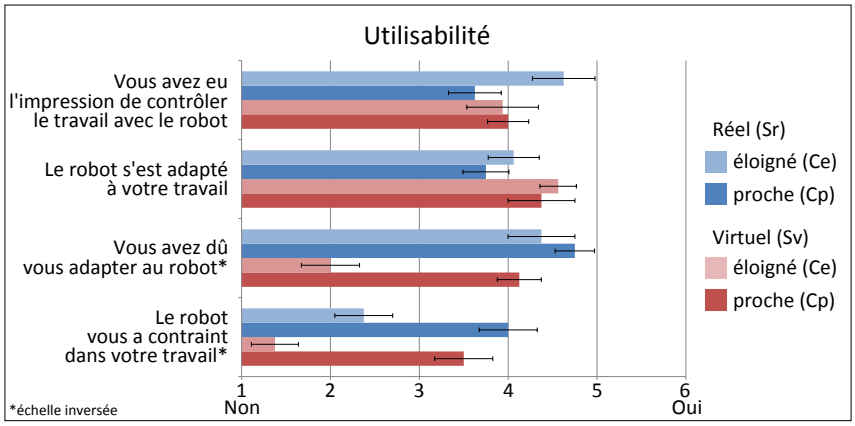


FIGURE 6.12 – Les résultats du questionnaire Q_c pour les questions sur l'utilisabilité

Aucune différence significative n'a été trouvée pour les deux premières questions (contrôle du travail par l'opérateur et adaptation du robot à l'opérateur). En revanche, des différences ont été trouvées pour l'adaptation de l'opérateur au robot ($p = 0{,}02$) et pour les contraintes liées au robot ($p = 0{,}006$).

Globalement, la configuration proche du robot a imposé plus de contraintes aux opérateurs, qui ont dû plus s'adapter, à la fois en situation réelle et en situation virtuelle. En effet, la position fixe du robot sur la ligne d'assemblage n'autorisait pas les opérateurs à déborder physiquement de leur pas de travail et à prendre du retard (ce qui est possible sur les lignes d'usine, en s'adaptant et en s'accordant avec l'opérateur du poste suivant) et cette configuration devenait problématique lorsque le robot était trop proche de l'opérateur. On retrouve cette tendance légèrement pour les autres questions (non significativement) : les opérateurs semblaient mieux contrôler la situation en configuration éloignée, pour laquelle le robot semblait également plus s'adapter à l'opérateur.

On peut également noter que les résultats concernant la situation virtuelle semblent meilleurs que la situation réelle : les résultats sont plus bas pour les deux dernières questions (donc meilleurs) en virtuel, surtout pour la configuration éloignée. La situation virtuelle imposait moins de contraintes aux opérateurs et la présence du robot était parfois moins bien perçue.

6.2.4.3 Sécurité

Les résultats des questions liées à la sécurité sont représentés sur la Figure 6.13.

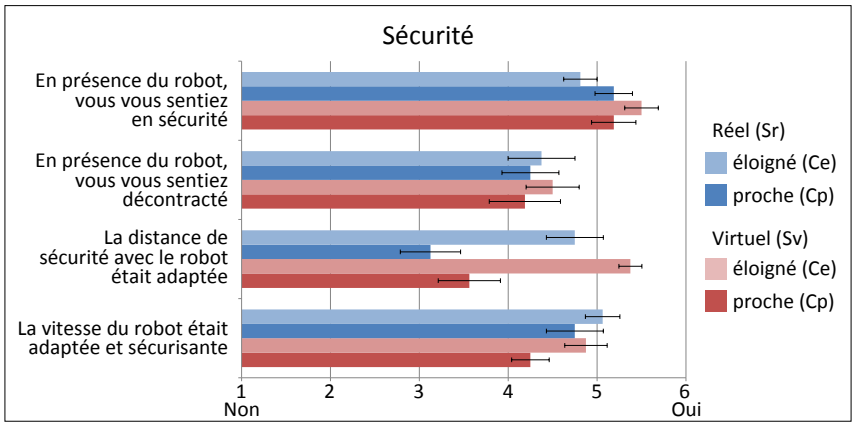


FIGURE 6.13 – Les résultats du questionnaire Q_c pour les questions sur la sécurité

Des différences significatives ont été décelées seulement pour la distance de sécurité avec le robot ($p = 0{,}002$) : la distance était mieux adaptée en configuration éloignée qu'en configuration proche, à la fois en situation réelle et en situation virtuelle. Cette tendance se retrouve également pour les autres questions (de manière non significative) : les opérateurs semblaient plus relaxés en configuration éloignée et la vitesse du robot leur semblait plus appropriée (même si elle était en réalité identique dans chaque configuration).

Ainsi, les opérateurs se sentaient plus en sécurité lorsqu'ils étaient situés loin du robot : au cours des tests, certains opérateurs perdaient leurs moyens au fur et à mesure qu'ils se rapprochaient du robot et, à partir d'une distance jugée trop proche, refusaient de travailler à côté du robot, abandonnaient les opérations en cours et commençaient à travailler sur la porte suivante. La distance entre l'opérateur et le robot, même si elle fait intervenir des considérations liées à la sécurité du poste, rejoint également des considérations liées à l'utilisabilité : du point de vue des opérateurs, la distance avec le robot semblait peu adaptée en configuration proche, à la fois pour des raisons de sécurité mais aussi pour des raisons pratiques.

6.2.4.4 Compétence du robot

Les résultats des questions liées à la compétence du robot sont représentés sur la Figure 6.14.

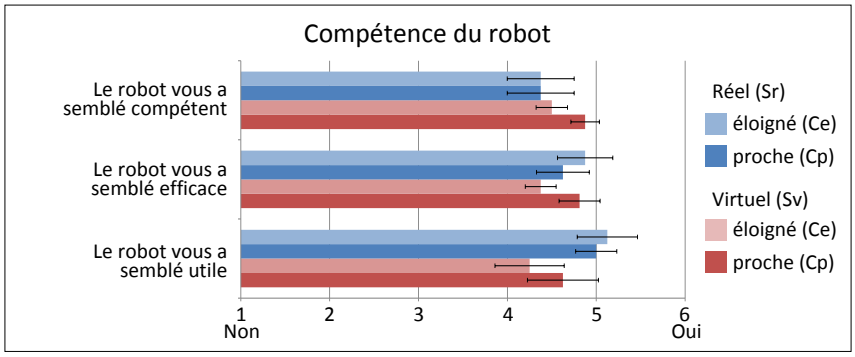


FIGURE 6.14 – Les résultats du questionnaire Q_c pour les questions sur la compétence du robot

Les questions regroupent des caractéristiques propres au robot : compétence, efficacité, utilité. Aucune différence significative n'a été trouvée pour ces questions. Du point de vue des

opérateurs, la tâche du robot était toujours la même et était effectuée toujours de la même façon (même en contact/proximité avec une personne) : il est donc cohérent que les opérateurs aient noté le robot de la même façon pour chaque condition. Ainsi, la situation d'expérimentation (réelle ou virtuelle) et la configuration de travail (éloignée ou proche) n'ont pas eu d'influence sur la perception qu'avaient les opérateurs des compétences du robot.

6.2.4.5 Impression et acceptabilité

Les deux dernières questions concernent l'impression générale des opérateurs et l'acceptabilité de la collaboration avec le robot. Les résultats sont représentés sur la Figure 6.15.

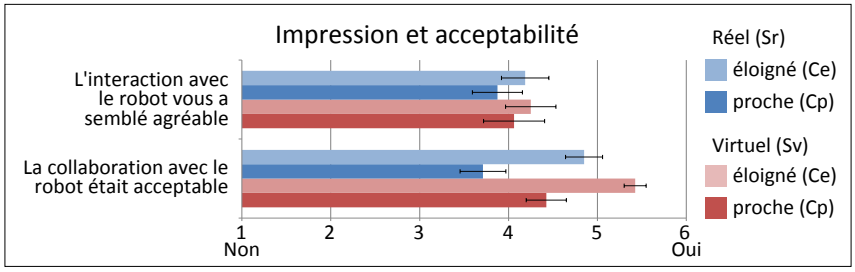


FIGURE 6.15 – Les résultats du questionnaire Q_c pour les questions sur l'impression et l'acceptabilité

Des différences significatives n'ont été trouvées que pour l'acceptabilité ($p = 0{,}002$). Globalement, la configuration éloignée a été perçue plus acceptable, à la fois en situation réelle et en situation virtuelle. On retrouve cette tendance pour la question sur l'impression : l'interaction avec le robot a été perçue légèrement plus agréable en situation éloignée. De plus, on peut noter que, en valeur absolue pour l'acceptabilité, la situation virtuelle a été légèrement mieux notée que la situation réelle. Cela semble cohérent puisque la situation virtuelle, avec un robot virtuel, représente moins de contraintes dans l'activité et moins de danger avec le robot.

6.2.5 Résultats du questionnaire sur les situations d'expérimentation

Le questionnaire Q_s (voir Tableau 6.3) était posé à l'issue de chaque demi-journée pour comparer les impressions des opérateurs vis-à-vis de chaque situation d'expérimentation : réelle (S_r) et virtuelle (S_v). Le questionnaire contenait 11 questions regroupées en cinq thèmes principaux : la familiarisation (2 questions), l'utilité (3 questions), la sécurité (3 questions), l'efficacité (3 questions) et l'acceptabilité (1 question).

Les réponses aux questions s'effectuaient sur une échelle de 1 à 6, 1 signifiant un désaccord avec l'intitulé et 6 un accord complet. Les thèmes des questions n'étaient pas indiqués aux opérateurs.

Dans la suite, nous présentons d'abord les résultats globaux en considérant les thèmes principaux, puis nous détaillons les réponses aux questions de chaque thème indépendamment.

6.2.5.1 Résultats globaux

Les résultats du questionnaire Q_s sont représentés sur la Figure 6.16 et regroupés par thèmes (moyennes des questions correspondantes). Des tests de Wilcoxon ont été menés pour déceler

Thèmes	Questions	Réponses							
Familiarisation	Vous avez eu suffisamment de temps pour vous familiariser avec les opérations	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
	Vous étiez à l'aise avec les opérations à effectuer	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
Utilité	Le robot est un gain pour mieux réussir votre travail	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
	Le robot est un gain pour la santé	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
	Dans l'avenir, un système similaire vous semblerait utile dans votre travail	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
Sécurité	Vous vous êtes senti en sécurité	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
	L'aspect du robot était sécurisant	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
Efficacité	Vous avez trouvé que la collaboration avec le robot était efficace	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
	Vous en tant qu'opérateur vous êtes senti aussi efficace que vous l'auriez voulu	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
	Le robot était efficace	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
Acceptabilité	La collaboration avec le robot était acceptable	Non	1	2	3	4	5	6	Oui

TABLE 6.3 – Le questionnaire Q_s sur les situations d'expérimentation

les différences significatives entre situations (disponibles en Annexe B) : aucune différence significative n'a été décelée entre S_r et S_v. Ceci montre que la situation d'expérimentation (réelle ou virtuelle) n'a pas eu d'influence sur les impressions des opérateurs.

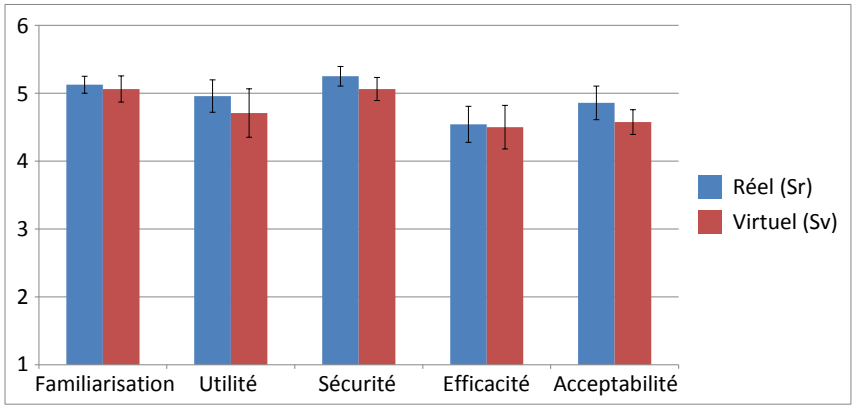


FIGURE 6.16 – Les résultats du questionnaire Q_s sur les situations d'expérimentation regroupés par thèmes

Les résultats du questionnaire Q_s pour chaque thème sont détaillés dans la suite.

6.2.5.2 Familiarisation

Les résultats des questions sur la familiarisation sont disponibles sur la Figure 6.17. Globalement, les opérateurs ont eu assez de temps pour s'entraîner sur les opérations à la fois en environnements réel et virtuel (notes supérieures à 5). Les opérateurs étaient également à l'aise avec les opérations à effectuer au cours des tests (dû au fait qu'ils étaient expérimentés sur ces postes de montage), même si on peut déceler une note légèrement plus faible en environnement virtuel : certaines opérations en environnement virtuel étaient plus délicates à effectuer à cause notamment de l'absence de retour d'effort.

6.2.5.3 Utilité

La Figure 6.18 montre les résultats des questions liées à l'utilité. Les opérateurs ont trouvé le poste collaboratif utile pour la réussite de leur travail, mais surtout pour leur santé : certains opérateurs étaient bien conscients des problèmes ergonomiques dus aux postures difficiles (pour

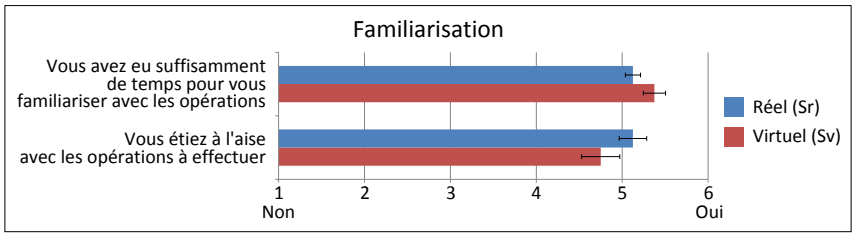


FIGURE 6.17 – Les résultats du questionnaire Q_s pour les questions sur la familiarisation

atteindre les gabarits) ou aux mouvements du poignet (pour manier la roulette). L'apport d'un robot pour cette opération était donc apprécié.

Aucune différence significative n'a été perçue entre la situation réelle et la situation virtuelle, même si on peut noter des résultats légèrement plus faibles en situation virtuelle : il semblerait que c'est surtout dans la situation réelle que l'utilité du robot ait été le mieux envisagée.

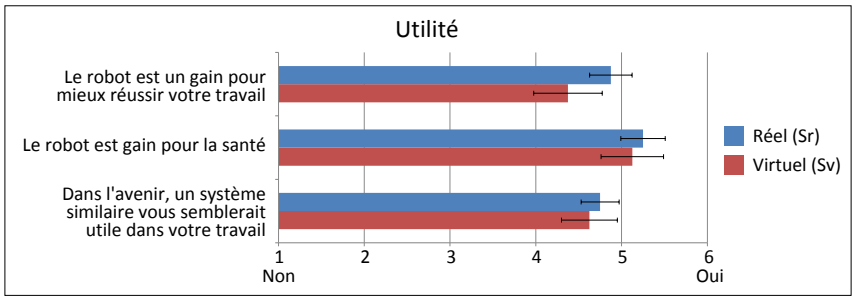


FIGURE 6.18 – Les résultats du questionnaire Q_s pour les questions sur l'utilité

6.2.5.4 Sécurité

Les résultats des questions liées à la sécurité sont présentés sur la Figure 6.19. Les opérateurs se sont sentis en sécurité dans les deux situations (réelle et virtuelle), à des niveaux élevés (réponse moyenne d'environ 5,5 sur 6). Ceci est dû au fait que les situations d'expérimentation étaient présentées correctement aux opérateurs avant les tests : déroulement des opérations, fonctionnement du robot, sécurité du poste. Le robot leur était présenté comme étant collaboratif et ne pouvant pas faire de mal à une personne. Cette impression de sécurité a sans doute aussi été influencée par l'aspect du robot (mousse protectrice), qui a été noté positivement dans les deux situations.

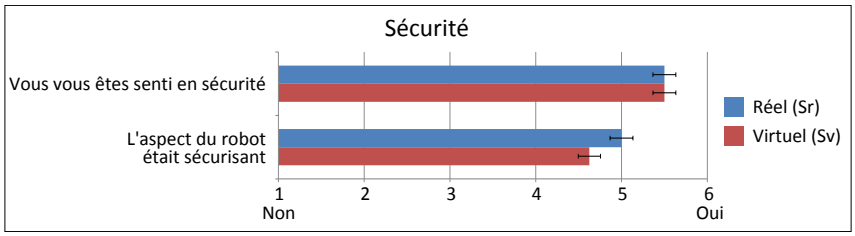


FIGURE 6.19 – Les résultats du questionnaire Q_s pour les questions sur la sécurité

6.2.5.5 Efficacité

La Figure 6.20 montre les résultats des questions liées à l'efficacité (de la collaboration, de l'opérateur et du robot). Aucune différence significative n'a été perçue entre les situations (réelle et virtuelle), mais il semble que les opérateurs se soient sentis légèrement moins efficaces en environnement virtuel : en effet, l'absence de retours haptique et sonore rendait certaines opérations délicates à effectuer.

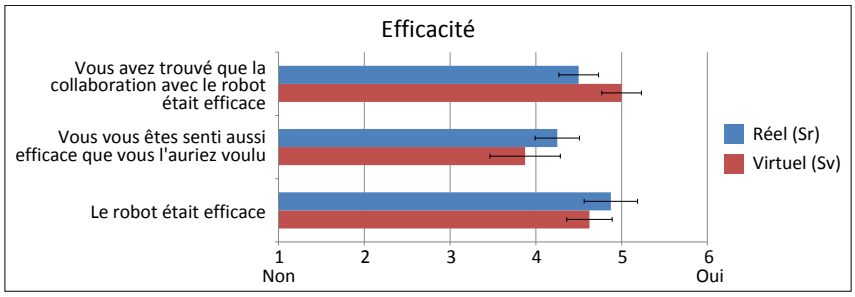


FIGURE 6.20 – Les résultats du questionnaire Q_s pour les questions sur l'efficacité

6.2.5.6 Acceptabilité

Les résultats de la seule question liée à l'acceptabilité sont représentés sur la Figure 6.21. De manière générale, la coprésence avec le robot a été bien perçue et bien notée (plus de 4,5 sur 6) : du point de vue des opérateurs, la coprésence avec le robot était acceptable et aurait pu être envisagée en usine (sous réserve de quelques modifications). Aucune différence n'a été perçue entre la situation réelle et la situation virtuelle : ceci montre que les opérateurs se représentaient la coprésence avec le robot de la même manière dans ces deux situations.

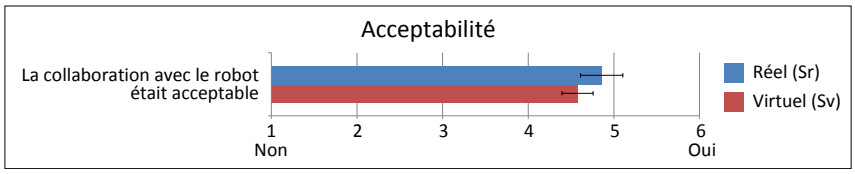


FIGURE 6.21 – Les résultats du questionnaire Q_s pour les questions sur l'acceptabilité

6.2.6 Résultats des mesures physiologiques

Des mesures physiologiques étaient captées sur les opérateurs pour estimer leur état affectif au cours des tests. Les mesures physiologiques utilisées étaient le rythme cardiaque (calculé à l'aide du PPG) et la conductance de la peau (électrodes EDA). Ces mesures ne pouvaient pas être prises pendant le montage des portes : l'acquisition s'effectuait sur les doigts des opérateurs et le mouvement des mains pendant les opérations empêchait d'obtenir un signal stable et non bruité. Ces mesures étaient donc acquises quand l'opérateur était au repos (voir le protocole du Tableau 6.1) : au début de chaque condition (ϕ_0) et à l'issue de chaque cycle de 4 portes (ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3, ϕ_4). L'opérateur était alors assis et ses mains reposaient sur une table face à lui. Les mesures étaient récoltées immédiatement après la finalisation de la dernière porte du cycle, pendant 2 à 3 minutes. C'était également le temps nécessaire aux coordinateurs pour réinitialiser le cycle des

portes, démonter les pièces de montage et les repositionner. Ainsi, pour chaque configuration, un total de cinq acquisitions étaient réalisées, pour un total de 20 acquisitions sur la journée par opérateur (5 acquisitions $\times$ 2 conditions $\times$ 2 demi-journées).

Pour chaque acquisition, les indicateurs utilisés étaient la moyenne du rythme cardiaque et la moyenne de la conductance de la peau, générées sur la première minute des acquisitions. A l'issue des tests, l'état affectif de chaque opérateur était ainsi décrit par 20 indicateurs pour le rythme cardiaque et 20 indicateurs pour la conductance de la peau. Afin d'unifier les résultats entre opérateurs, il a fallu normaliser les indicateurs obtenus. Pour chaque opérateur, la valeur minimum m et la valeur maximum M sur les 20 indicateurs étaient générées, puis chaque indicateur était normalisé entre ces deux valeurs. Dans la suite de l'analyse des mesures physiologiques, seuls les indicateurs ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 et ϕ_4 ont été pris en compte (les valeurs ϕ_0 ont uniquement servi à la normalisation des mesures par opérateur).

La Figure 6.22 représente les résultats issus des mesures physiologiques. Pour chaque configuration, la moyenne sur les valeurs normalisées ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 et ϕ_4 et sur tous les opérateurs est affichée. Des analyses de variance à deux variables ont été menées pour analyser les différences significatives entre configurations (proche ou éloignée), entre situations (réelle ou physique) et l'interaction entre les deux (les résultats des tests statistiques sont disponibles en Annexe B).

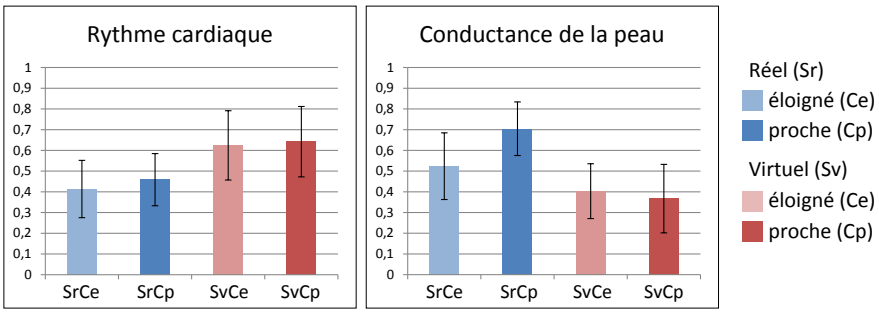


FIGURE 6.22 – Les résultats des mesures physiologiques

A la fois pour le rythme cardiaque et la conductance de la peau, une influence significative de la situation a été perçue ($p = 0{,}08$ pour le rythme cardiaque ; $p = 0{,}03$ pour la conductance de la peau). On pourrait penser que les opérateurs étaient plus décontractés (conductance plus basse) et également plus actifs (rythme cardiaque plus haut) en environnement virtuel qu'en environnement réel. Ces différences sont cependant à analyser avec précaution : les tests pour les deux situations étaient menés à deux moments différents de la journée (matin et après-midi) et les mesures physiologiques peuvent varier au cours de la journée (réveil, repas). D'autres méthodes d'analyse et de normalisation des mesures physiologiques permettraient une interprétation plus pertinente que nous envisageons comme perspectives. Nous nous intéressons plutôt à l'influence de la configuration de coprésence (proche ou éloignée) dans chaque situation et à d'éventuelles différences dans cette influence entre la situation réelle et la situation virtuelle.

Aucune différence significative n'a été décelée pour la configuration de coprésence concernant le rythme cardiaque, dans chaque situation. Une légère augmentation du rythme cardiaque peut cependant être décelée dans la configuration proche, notamment en situation réelle. Ceci rejoint les résultats des questionnaires : en travaillant plus proche du robot, les opérateurs étaient plus contraints dans leurs tâches, devaient mieux s'adapter et accélérer la cadence, ce qui pouvait augmenter leur rythme cardiaque. Cette tendance a été moins visible en environnement virtuel.

Une différence significative a été décelée pour la conductance de la peau ($p = 0{,}009$) au ni-

veau de l'interaction entre la situation (réelle/virtuelle) et la configuration (éloignée/proche). La conductance était effectivement plus élevée en configuration proche qu'en configuration éloignée en situation réelle ($p = 0{,}04$), mais cette différence n'a pas été décelée en situation virtuelle. En situation réelle, les opérateurs étaient plus stressés quand ils travaillaient proches du robot. Ce stress est apparu parce que le robot représentait une contrainte et les opérateurs avaient besoin de s'adapter pour finir à temps. Cependant, cette tendance n'est pas apparue en environnement virtuel : les opérateurs étaient moins conscients de la présence du robot et ressentaient moins de menace de la part du robot virtuel.

Dans l'ensemble, le travail proche du robot a poussé les opérateurs à travailler plus vite, ce qui a induit une augmentation (faible) du rythme cardiaque et une augmentation du stress. Cette tendance n'est cependant pas apparue en environnement virtuel.

6.2.7 Résultats liés à la performance

Même s'il était indiqué aux opérateurs que l'objectif des tests n'était pas d'évaluer l'efficacité du poste collaboratif, des données liées à la performance des opérations étaient mesurées continuellement au cours des tests : le nombre d'opérations non effectuées dans les temps, le nombre de proximités détectées par le robot et le temps complet de chaque montage de porte. Ces données avaient pour but de récolter des mesures objectives et de déceler des éventuels biais dans les conditions.

En environnement virtuel, ces données étaient enregistrées automatiquement grâce au logiciel de réalité virtuelle et stockées sous forme texte. En environnement réel, les tests étaient filmés (avec consentement des opérateurs) : le revisionnage des vidéos et leur annotation ont permis d'en extraire les données nécessaires.

Les résultats des mesures de performance sont représentés sur la Figure 6.23. Des tests de Wilcoxon ont été menés pour déceler les différences significatives pour le nombre d'opérations non effectuées et le nombre de proximités détectées, tandis que des analyses de variance ont été utilisées pour le temps de complétion (les résultats des tests statistiques sont disponibles en Annexe B).

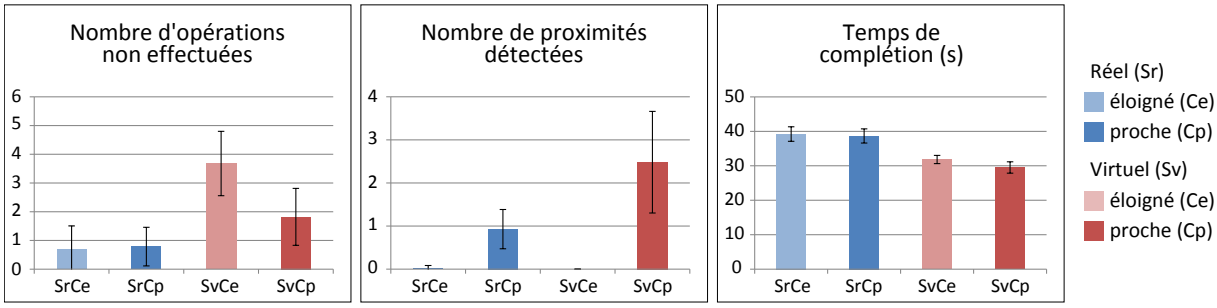


FIGURE 6.23 – Les résultats de performance des tests : le nombre d'opérations non effectuées, le nombre de proximités détectées et le temps de complétion

De manière générale, les opérateurs n'ont pas eu de difficultés à effectuer leurs opérations, à la fois en situations réelle et virtuelle. Les opérations étaient toutefois plus simples et plus rapides à effectuer en environnement virtuel. La vitesse du défilé des portes en virtuel était souvent réhaussée au cours des tests (de 0,068 m/s à 0,073 m/s ou encore 0,078 m/s) en fonction de la performance des opérateurs et des conditions (surtout en configuration rapprochée pour amener les opérateurs à interagir avec le robot). Ceci explique le temps de complétion des portes plus

court en environnement virtuel qu'en environnement réel. Cette accélération de la ligne, alliée à la difficulté de préhension de certaines pièces virtuelles, a aussi probablement fait augmenter le nombre d'opérations non effectuées dans les temps en situation virtuelle et peut expliquer la baisse d'efficacité ressentie par les opérateurs en environnement virtuel (voir Section 6.2.5.5).

Lorsqu'ils travaillaient en situation virtuelle, les opérateurs se comportaient différemment et étaient moins conscients de la présence du robot à leurs côtés : soit parce qu'ils ne pouvaient pas le sentir haptiquement, soit parce qu'ils ne pouvaient pas l'apercevoir (champ de vision réduit dû aux lunettes de stéréovision), ou encore parce qu'ils ne pouvaient pas entendre le robot bouger à côté d'eux (seul un signal sonore était produit lorsque l'opérateur était à proximité). Les opérateurs se rendaient compte de la proximité du robot uniquement lorsque le signal sonore retentissait, ce qui explique également le plus grand nombre de proximités détectées en configuration rappochée virtuelle par rapport à la situation réelle.

Enfin, la conscience réduite de la proximité du robot en situation virtuelle a probablement rendu les opérateurs plus détendus, et cette relaxation était d'autant plus importante quand les opérateurs étaient loin du robot. En étant plus détendus, les opérateurs passaient plus de temps sur les opérations et prenaient du retard : en effet, le nombre d'opérations non effectuées et le temps de complétion étaient plus élevés pour la configuration éloignée que pour la configuration proche (en situation virtuelle). Un test de Wilcoxon a montré que cette différence était significative pour le nombre d'opérations non effectuées ($p < 10^{-3}$), tandis qu'une analyse de variance a montré une différence significative pour le temps de complétion ($p < 0,001$).

6.2.8 Synthèse des résultats

Les résultats liés aux questionnaires montrent deux aspects importants. D'une part, la configuration éloignée du robot semble être préférée des opérateurs, à la fois en termes d'utilisabilité, de sécurité et d'acceptabilité. D'autre part, cette préférence est observée à la fois en situation réelle et en situation virtuelle : les réponses aux questionnaires étaient similaires dans les deux situations. Ceci montre que les impressions des opérateurs en situation virtuelle semblent bien correspondre à celles qu'ils ont en situation réelle. La réalité virtuelle semble ainsi être un outil intéressant et pertinent pour l'étude de l'acceptabilité de la collaboration homme-robot lorsqu'il s'agit de recueillir des impressions subjectives via des questionnaires.

Cependant, des différences ont été trouvées entre la situation réelle et la situation virtuelle. En configuration proche du robot, une hausse de la conductance de la peau des opérateurs (et donc une montée de stress) a été observée, mais seulement en situation réelle (et pas en situation virtuelle). Ceci montre que les états affectifs et les réactions émotionnelles des opérateurs n'étaient pas tout à fait les mêmes en situation virtuelle et en situation réelle : les opérateurs étaient généralement plus relaxés en environnement virtuel, soit par l'absence de danger physique, soit par l'absence de conscience de la présence du robot, ou par une combinaison des deux. De plus, les comportements des opérateurs étaient légèrement différents dans chaque situation, comme le montrent les résultats liés à la performance. La réalité virtuelle ne peut ainsi pas rendre compte de toutes les réactions des opérateurs, tout du moins dans cette configuration précise de collaboration homme-robot (opérateur et robot côte à côte).

6.3 Etude des mouvements

La distribution spatiale est bien entendu un facteur important à étudier pour évaluer l'acceptabilité de la coprésence homme-robot, notamment en environnement industriel. Mais d'autres

facteurs peuvent intervenir, plus focalisés sur le robot, comme son apparence et ses mouvements.

Dans l'optique du partage d'espace entre un opérateur et un robot, une deuxième étude a été menée pour évaluer l'impact du profil des mouvements du robot sur la perception des opérateurs. Il s'agit d'une étude plus théorique concernant les caractéristiques du mouvement : il nous paraissait intéressant de comparer des mouvements proches de ceux d'une machine et des mouvements proches de ceux d'un humain pour déterminer lesquels étaient les plus acceptables en termes de sécurité, d'efficacité ou encore de stress ressenti. Cette étude se focalisant sur la perception visuelle des mouvements des robots, des tests en environnement réel n'étaient pas nécessaires : des tests utilisateurs ont ainsi été menés uniquement en environnement virtuel.

Un article de journal a été soumis en août 2014 pour présenter les résultats issus de cette expérimentation.

6.3.1 Mise en place

Le cas d'étude utilisé pour comparer différents profils de mouvements est celui de la feuille d'étanchéité : un robot doit passer une roulette (située à l'extrêmité de son effecteur) sur le contour d'une feuille posée sur une porte de voiture. A la différence de l'étude précédente sur la distribution spatiale, nous avons choisi d'utiliser un robot 7 axes Motoman SIA10 (le robot Kuka KR5SI de l'étude précédente possède 6 axes) : cette configuration de bras robotisé offre plus de liberté dans la génération des mouvements. Le cas d'étude a été mis en place dans le logiciel de réalité virtuelle Virtools (voir Figure 6.24).

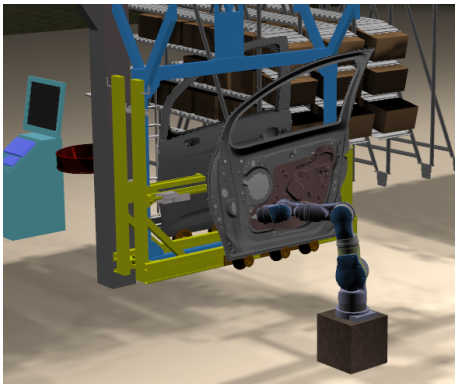


FIGURE 6.24 – Le cas d'étude dans l'environnement de simulation Virtools

Afin de générer plusieurs profils de mouvements pour le parcours de la feuille, nous avons utilisé les heuristiques du mouvement humain mises en place avec l'entreprise SpirOps et présentées dans la Section 5.1.4.3 du Chapitre 5. Ces heuristiques permettent de jouer sur trois paramètres du mouvement :

- L'aspect de la base du robot (P_1) ;
- L'aspect de l'effecteur du robot (P_2) ;
- Le profil de vitesse (P_3).

Dans un premier temps, différents réglages et différentes combinaisons de chaque paramètre ont été mis en place et observés afin d'obtenir des premiers ressentis subjectifs. Ces observations préliminaires ont permis de déterminer les réglages adéquats pour différencier deux aspects dans chaque paramètre : un aspect mécanique et un aspect anthropomorphe. Ces réglages sont disponibles en Annexe C.

Nous avons ensuite choisi de considérer huit profils de mouvements différents, en fonction du caractère mécanique ou anthropomorphe de chaque paramètre (voir Tableau 6.4) : R_0, R_1, R_2, R_3, R_{12}, R_{13}, R_{23}, R_{123} (les indices correspondent aux paramètres anthropomorphes). Pour l'évaluation, un robot de référence R_{ref} a été choisi comme celui étant complètement mécanique (R_0). Pour chaque paramètre, les valeurs par défaut correspondent à un mouvement jugé mécanique : aspect rigide pour la base et l'effecteur du robot (absence de retard et d'inertie) et profil de vitesse linéaire (vitesse constante). A l'inverse, les valeurs anthropomorphes des paramètres permettent de rendre les profils de mouvements plus humains : aspect souple de la base du robot, aspect souple de l'effecteur et profil de vitesse anthropomorphe suivant la loi de puissance 2/3.

Robots	P1 : Aspect de la base	P2 : Aspect de l'effecteur	P3 : Profil de vitesse
R_{ref}	rigide	rigide	linéaire
R_0	rigide	rigide	linéaire
R_1	souple	rigide	linéaire
R_2	rigide	souple	linéaire
R_3	rigide	rigide	anthropo.
R_{12}	souple	souple	linéaire
R_{23}	rigide	souple	anthropo.
R_{13}	souple	rigide	anthropo.
R_{123}	souple	souple	anthropo.

TABLE 6.4 – Les différents profils de mouvement retenus pour l'évaluation

La trajectoire du robot a été définie sur le contour de la feuille d'étanchéité. Afin de faire ressortir l'aspect souple de la base et de l'effecteur, il a été nécessaire d'imposer des points d'arrêt (2 secondes) au robot sur cette trajectoire : ces points sont représentés sur la Figure 6.25. Nous renvoyons le lecteur à l'Annexe C pour visualiser la trajectoire en détail ainsi que la position du robot par rapport à cette trajectoire.

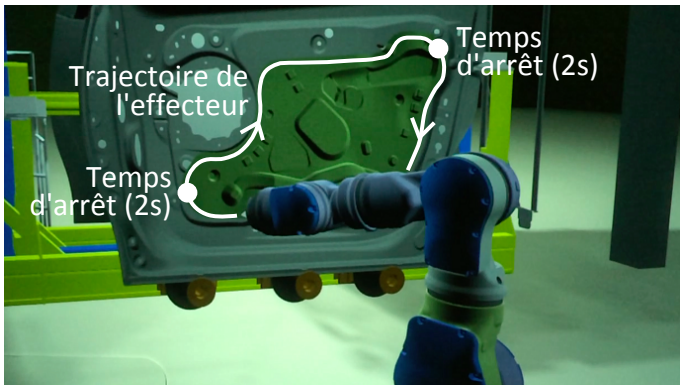


FIGURE 6.25 – La trajectoire du robot sur la porte et les points d'arrêt

Les huit profils de mouvements étaient générés dans le logiciel SpirOps (voir Figure 6.26). Ce logiciel communiquait avec le logiciel de réalité virtuelle Virtools selon l'architecture présentée dans la Section 5.1.4.3 du Chapitre 5. Les informations des huit profils de mouvements étaient envoyées constamment au logiciel Virtools pour contrôler les mouvements du robot virtuel. En

fonction de la condition à visualiser et à tester, le robot virtuel utilisait les informations du profil de mouvements correspondant.

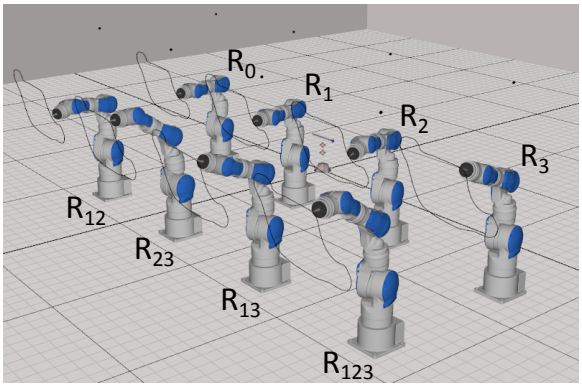


FIGURE 6.26 – Les huit conditions générées dans le logiciel SpirOps

6.3.2 Tests utilisateurs

Cette étude se focalisant sur la perception visuelle des mouvements des robots, des tests en environnement réel n'étaient pas nécessaires : les utilisateurs étaient principalement passifs et nous nous intéressions aux profils de mouvements. Des tests utilisateurs ont ainsi été menés uniquement en environnement virtuel dans la salle immersive de l'école des Mines (voir Figure 6.27). Les utilisateurs étaient assis face à l'écran rétroprojeté et observaient les profils de mouvements à l'aide de lunettes stéréoscopiques actives. Leur point de vue était également suivi (caméras infrarouge ARTrack). S'ils le souhaitaient, les utilisateurs pouvaient se déplacer dans la salle pour mieux observer les mouvements (dans les faits, les utilisateurs se sont peu déplacés ou n'ont bougé que la tête).

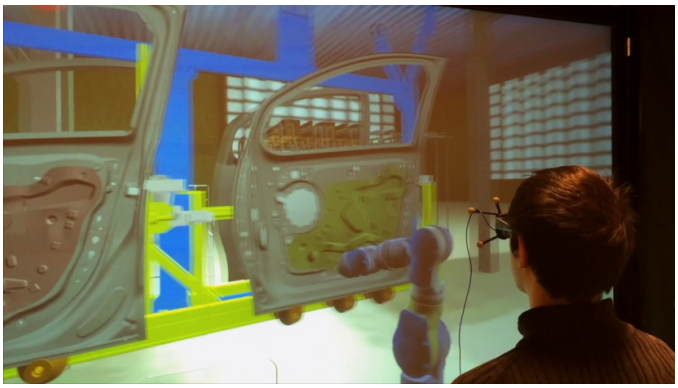


FIGURE 6.27 – Un utilisateur observant les mouvements du robot en environnement virtuel

Chaque utilisateur devait observer toutes les conditions de profil de mouvements et les comparer au mouvement de référence. Afin de se focaliser sur les ressentis subjectifs des utilisateurs (et pas sur leur capacité à déceler des différences), le mouvement de référence et le mouvement à comparer n'étaient jamais montrés simultanément : pour chaque condition, les utilisateurs commençaient par observer le mouvement de référence aussi longtemps qu'ils le souhaitaient, puis le mouvement à comparer leur était présenté. A l'issue de chaque condition, les utilisateurs

devaient répondre à un questionnaire leur demandant de comparer le profil observé à celui de référence.

L'ordre des conditions était aléatoire pour chaque utilisateur. De plus, trois occurences du robot R_0 étaient présentées. Il y avait donc en tout 10 conditions (dont trois fois la même). Les utilisateurs étaient informés que le robot de test pouvait être identique à celui de référence. Les trois occurences de R_0 permettaient de déterminer que les utilisateurs étaient bien capables de discerner qu'il n'y avait pas de différence. Les tests s'arrêtaient dès que toutes les conditions étaient passées.

Le questionnaire est représenté dans le Tableau 6.5. Il regroupe des questions liées à différents thèmes : l'anthropomorphisme du mouvement (1 question), le caractère naturel (3 questions), la compétence (3 questions), la sécurité (5 questions) et l'impression générale (1 question). Les questions étaient posées dans un ordre différent aux utilisateurs pendant les tests. Pour chaque question, une échelle de Likert de 7 points était utilisée : les utilisateurs devaient donner une note entre -3 et +3 relative au robot de référence. Si une différence était perçue de manière négative, une note négative était donnée ; si une différence était perçue de manière positive, une note positive était donnée ; si aucune différence n'était perçue, la note 0 était attribuée.

Thèmes	Questions	Réponses
Anthropo.	Le robot vous a-t-il semblé contrôlé plutôt par un humain ou plutôt par une machine ?	-3 -2 -1 0 1 2 3
Naturel	Les mouvements du robot vous ont-ils semblé plus ou moins naturels ?	-3 -2 -1 0 1 2 3
	Les mouvements du robot vous ont-ils semblé plus ou moins souples ?	-3 -2 -1 0 1 2 3
	Les mouvements du robot vous ont-ils semblé plus ou moins mécaniques ?*	-3 -2 -1 0 1 2 3
Compétence	Les mouvements du robot vous ont-ils semblé plus ou moins compétents ?	-3 -2 -1 0 1 2 3
	Les mouvements du robot vous ont-ils semblé plus ou moins rapides ?	-3 -2 -1 0 1 2 3
	Préféreriez-vous travailler plus ou moins à côté de ce robot ?	-3 -2 -1 0 1 2 3
Sécurité	Les mouvements du robot vous ont-ils semblé plus ou moins agressifs ?*	-3 -2 -1 0 1 2 3
	Les mouvements du robot vous ont-ils semblé plus ou moins relaxants ?	-3 -2 -1 0 1 2 3
	Les mouvements du robot vous ont-ils semblé plus ou moins prévisibles ?	-3 -2 -1 0 1 2 3
	Vous êtes-vous senti plus ou moins en sécurité ?	-3 -2 -1 0 1 2 3
	Vous êtes-vous senti plus ou moins stressé ?*	-3 -2 -1 0 1 2 3
Impression	Avez-vous plus ou moins bien aimé les mouvements de ce robot ?	-3 -2 -1 0 1 2 3

*échelle inversée

TABLE 6.5 – Le questionnaire utilisé pour évaluer les mouvements

Le panel d'utilisateurs était composé de 39 personnes (17 hommes et 22 femmes). Ces personnes provenaient de domaines divers (étudiants et personnels de l'école des Mines) et étaient d'âges variés (moyenne de 35 ans).

6.3.3 Résultats du questionnaire

Les résultats complets du questionnaire pour chaque robot et pour chaque question sont disponibles en Annexe C. Cependant, afin de simplifier l'analyse des résultats, les réponses au questionnaire ne sont pas présentées par robots mais par paramètres. Pour chaque paramètre (P_1, P_2, P_3), deux groupes de robots ont été considérés (voir Tableau 6.6) :

- Les robots ayant le paramètre mécanique (groupe de 4 robots) ;
- Les robots ayant le paramètre anthropomorphe (groupe de 4 robots).

Pour le robot R_0, seule la dernière occurence a été prise en compte dans l'analyse des résultats.

Dans la suite, nous présentons d'abord les résultats globaux en considérant les thèmes principaux du questionnaire (moyennes sur toutes les questions correspondantes). Puis nous détaillons les résultats du questionnaire pour chaque thème séparément. Pour chaque thème et question du questionnaire, des tests de Wilcoxon ont été menés pour comparer les groupes de robots de

P1 : Aspect de la base		P2 : Aspect de l'effecteur		P3 : Profil de vitesse	
rigide	souple	rigide	souple	linéaire	anthropo.
R_0	R_1	R_0	R_2	R_0	R_3
R_2	R_{12}	R_1	R_{12}	R_1	R_{23}
R_3	R_{13}	R_3	R_{23}	R_2	R_{13}
R_{23}	R_{123}	R_{13}	R_{123}	R_{12}	R_{123}

TABLE 6.6 – Les sous-groupes de robots par paramètres : paramètre mécanique ou anthropomorphe

chaque paramètre et déceler les différences significatives. Les résultats des tests statistiques sont disponibles en Annexe C.

6.3.3.1 Résultats globaux

Les résultats globaux pour chaque thème et chaque paramètre sont représentés sur la Figure 6.28.

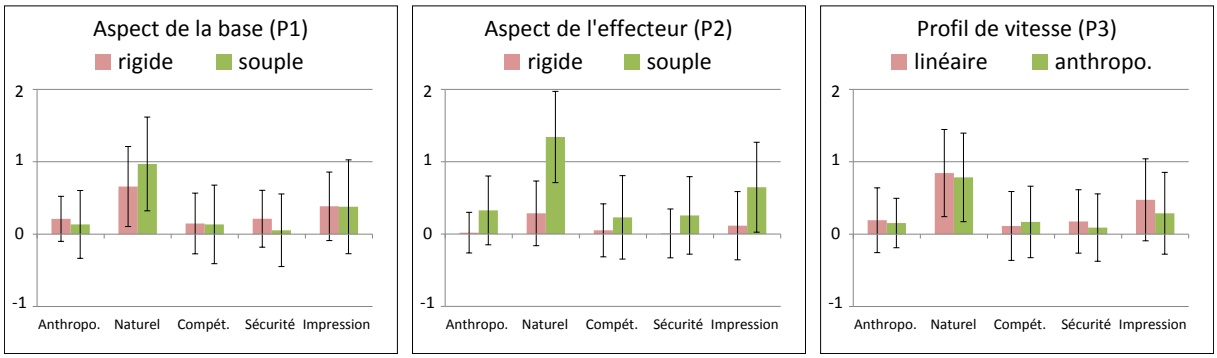


FIGURE 6.28 – Les résultats globaux du questionnaire pour les sous-groupes des paramètres P_1, P_2 et P_3

De manière générale, la première observation à effectuer est que le paramètre ayant eu le plus d'influence dans l'appréciation des mouvements est l'aspect souple de l'effecteur (P_2). En effet, des différences significatives ont été décelées pour tous les thèmes du questionnaire entre les sous-groupes du paramètre P_2 (rigide ou souple), tandis que des différences ont été perçues seulement pour l'aspect naturel et sécuritaire avec le paramètre P_1 (aspect de la base). Très peu de différences ont été décelées entre l'aspect linéaire et anthropomorphe du profil de vitesse (P_3).

Les robots ayant un effecteur d'aspect souple (P_2) ont obtenu de très bons résultats. Les mouvements de ces robots ont été perçus comme plus naturels ($p < 10^{-3}$) et plus humains ($p < 10^{-3}$) et ont été préférés des utilisateurs ($p < 10^{-3}$). Ces robots ont également été perçus comme légèrement plus compétents ($p = 0{,}003$) et ont donné une meilleure impression de sécurité ($p < 10^{-3}$). Ainsi, un robot ayant des mouvements souples au niveau de l'effecteur semble avoir été mieux perçu des utilisateurs, essentiellement sur l'aspect naturel et la préférence générale.

Les robots ayant une base d'aspect souple (P_1) ont également été perçus comme plus naturels du point de vue des utilisateurs ($p < 10^{-3}$), même si la différence a été moins forte que pour les

robots ayant un mouvement souple de l'effecteur (P_2). Les robots ayant P_1 souple ont cependant donné une moins bonne impression de sécurité ($p = 0{,}008$). Globalement, l'aspect souple de la base du robot (P_1) a eu un impact plus réduit que celui de l'effecteur (P_2).

Enfin, le profil de vitesse (P_3) semble avoir eu une influence quasi-nulle sur la perception des mouvements. Les deux sous-groupes (profil linéaire ou anthropomorphe) ont obtenu des résultats similaires, excepté pour la sécurité ($p = 0{,}02$, les mouvements anthropomorphes ont été perçus légèrement moins sécurisants).

Pour résumer, les aspects souples de la base et de l'effecteur ont été bien perçus des utilisateurs au niveau du caractère naturel des mouvements. Mais seuls les mouvements ayant un effecteur souple (P_2) semblent avoir été perçus comme plus humains et préférés des utilisateurs.

Une analyse plus détaillée a été conduite en ne considérant que les paramètres liés à la base (P_1) et à l'effecteur (P_2). Quatre sous-groupes de robots ont été formés (voir Tableau 6.7) :

- Les robots n'ayant aucun aspect souple (P_1 et P_2 rigides) ;
- Les robots ayant seulement la base souple (P_1 souple et P_2 rigide) ;
- Les robots ayant seulement l'effecteur souple (P_1 rigide et P_2 souple) ;
- Les robots ayant la base et l'effecteur souples (P_1 et P_2 souples).

P1 et P2 : Aspect combiné de la base et de l'effecteur			
P1 rigide P2 rigide	P1 souple P2 rigide	P1 rigide P2 souple	P1 souple P2 souple
R_0 R_3	R_1 R_{13}	R_2 R_{23}	R_{12} R_{123}

TABLE 6.7 – Les sous-groupes de robots pour l'influence combinée des paramètres P_1 et P_2

Les résultats de chaque sous-groupe sont représentés sur la Figure 6.29 pour chaque thème principal du questionnaire. Des tests de Wilcoxon ont été menés pour comparer chaque sous-groupe 2 à 2 (résultats disponibles en Annexe C).

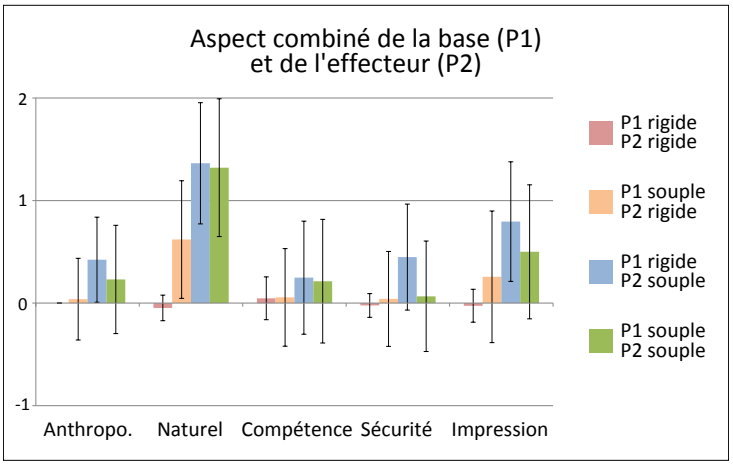


FIGURE 6.29 – Les résultats globaux du questionnaire pour les sous-groupes des paramètres combinés P_1 et P_2

De manière générale, les robots ayant seulement la base souple (P_1) ont toujours été moins bien notés que les robots ayant seulement l'effecteur souple (P_2), avec des différences significatives

pour tous les thèmes du questionnaire. Ceci rejoint les résultats précédemment exposés. Afin d'étudier l'influence combinée des paramètres P_1 et P_2, il convient d'analyser les résultats du sous-groupe ayant les deux paramètres souples à la fois. Ce sous-groupe a toujours été mieux noté que les robots ayant seulement la base souple. Cependant, il a été noté de manière équivalente, voire inférieure aux robots ayant seulement l'effecteur souple. En effet, les robots ayant seulement l'effecteur souple ont toujours obtenu les meilleurs résultats (de manière significative pour la sécurité, $p < 10^{-3}$).

Ainsi, le paramètre ayant le plus d'influence dans la perception des mouvements est le caractère souple de l'effecteur (P_2), qui est bénéfique en termes de caractère naturel, de préférence et de sécurité. En revanche, le caractère souple de la base (P_1) a tendance à réduire ces effets bénéfiques et à les inverser, notamment en termes de sécurité.

Dans la suite, nous analysons en détail chaque thème du questionnaire.

6.3.3.2 Anthropomorphisme et impression générale

L'anthropomorphisme et l'impression générale des mouvements sont regroupés sur la Figure 6.30.

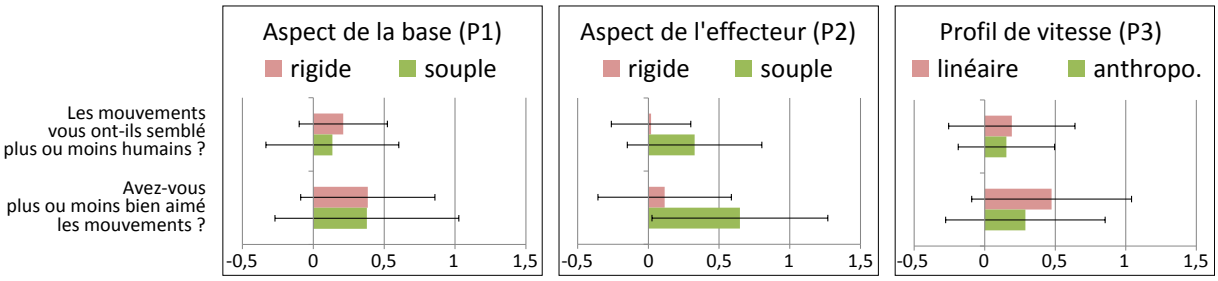


FIGURE 6.30 – Les résultats du questionnaire par sous-groupe pour les questions sur l'anthropomorphisme et l'impression générale

Aucune différence significative n'a été trouvée pour les sous-groupes des paramètres P_1 et P_3. En revanche, les différences sont significatives pour les deux questions entre les sous-groupes du paramètre P_2 ($p < 10^{-3}$). Ainsi, l'aspect souple de l'effecteur a été perçu comme plus humain de la part des utilisateurs, et il semblerait que ceci ait également amélioré l'impression générale vis-à-vis de ces mouvements.

6.3.3.3 Caractère naturel

La Figure 6.31 représente les résultats des questions sur le caractère naturel pour les sous-groupes des paramètres P_1, P_2 et P_3.

Aucune différence n'a été perçue concernant le profil de vitesse (P_3). En revanche, les aspects souples de la base (P_1) et de l'effecteur (P_2) ont toujours été perçus comme plus naturels, plus souples et moins mécaniques (les différences sont toutes significatives pour P_2 et seulement avec les deux dernières questions pour P_1). Ces résultats semblent cohérents : des mouvements sont perçus comme naturels quand ils sont souples et non mécaniques. On peut également noter que l'aspect souple de l'effecteur (P_2) a engendré de plus fortes réponses (différences plus fortes) que pour l'aspect souple de la base (P_1).

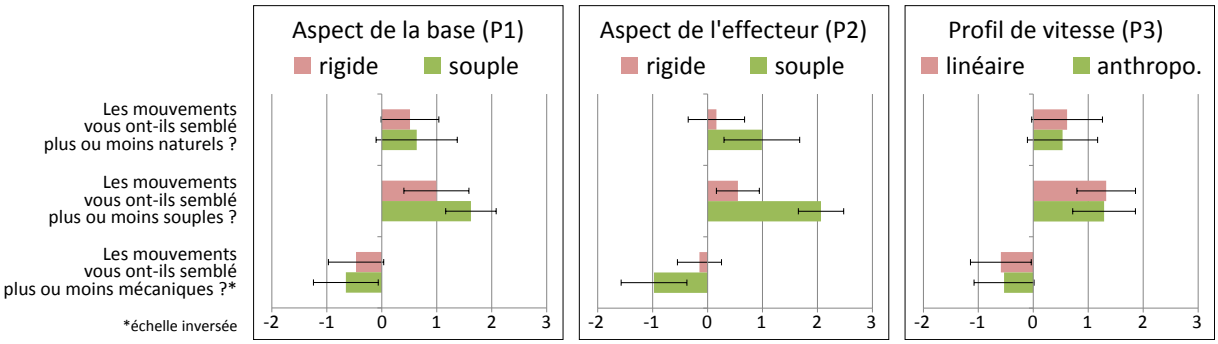


FIGURE 6.31 – Les résultats du questionnaire par sous-groupe pour les questions sur le caractère naturel

6.3.3.4 Compétence

Les résultats des questions sur la compétence des mouvements sont représentés sur la Figure 6.32.

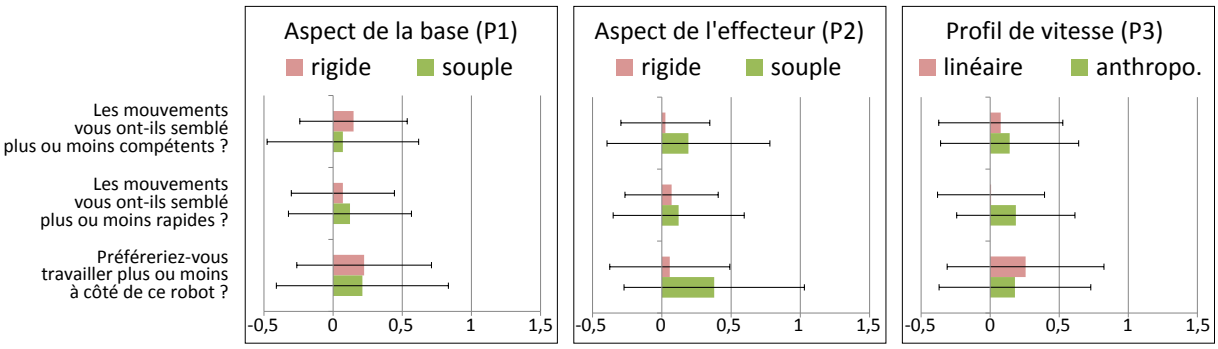


FIGURE 6.32 – Les résultats du questionnaire par sous-groupe pour les questions sur la compétence

Très peu de différences significatives ont été décelées pour les questions liées à la compétence des mouvements. De plus, les notes sont relativement faibles : entre 0 et 0,5 sur une échelle allant de -3 à 3. Les utilisateurs avaient en effet des avis neutres sur ces questions. On peut cependant noter que les robots ayant un effecteur souple (P_2) semblent avoir toujours obtenu de meilleurs résultats (différence significative pour la préférence au travail, $p = 0{,}003$).

6.3.3.5 Sécurité

La Figure 6.33 représente les résultats des questions liées à la sécurité.

Aucune différence n'a été perçue entre les sous-groupes du profil de vitesse (P_3). Pour l'aspect souple de l'effecteur (P_2), les différences étaient significatives pour toutes les questions, tandis que seul l'aspect prévisible était significatif pour P_1.

De manière générale, les robots ayant un effecteur souple (P_2) ont donné une meilleure impression de sécurité : ils étaient moins agressifs ($p < 10^{-3}$) et plus relaxants ($p < 10^{-3}$), les utilisateurs se sentaient plus en sécurité ($p = 0{,}01$) et moins stressés ($p = 0{,}05$). Cette tendance ne s'est pas retrouvée avec l'aspect souple de la base du robot (P_1).

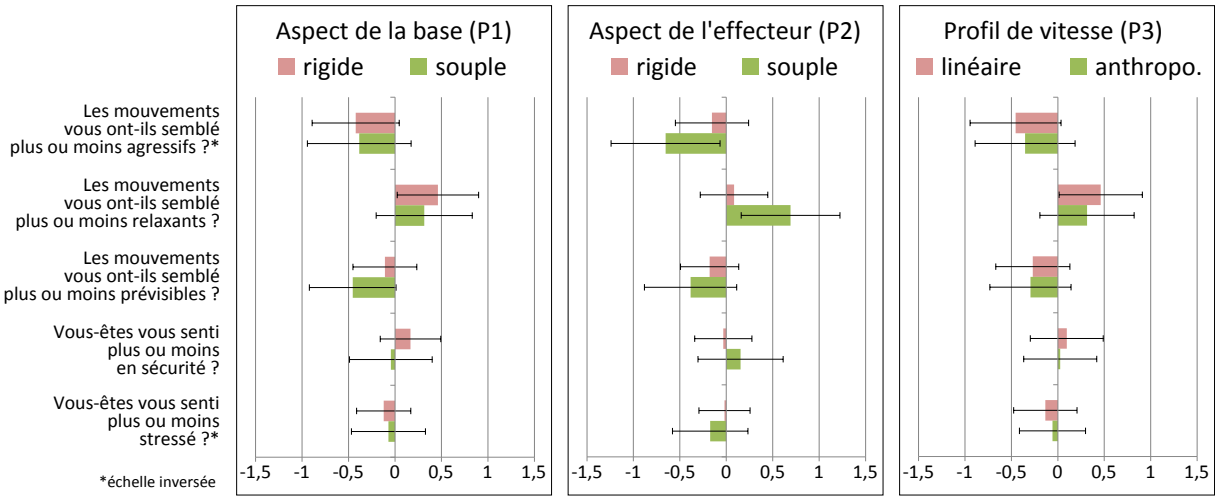


FIGURE 6.33 – Les résultats du questionnaire par sous-groupe pour les questions sur la sécurité

Un autre aspect intéressant est celui de la prévisibilité du mouvement : les aspects souples de la base et de l'effecteur ont tous les deux été perçus comme moins prévisibles ($p < 10^{-3}$ pour P_1, $p = 0{,}01$ pour P_2). Ainsi, un mouvement rigide est perçu comme plus prévisible et peut éventuellement engendrer une meilleure impression de sécurité.

6.3.4 Synthèse des résultats

De manière générale, les utilisateurs ont préféré les robots ayant des mouvements souples au niveau de l'effecteur. L'aspect souple de la base du robot a eu un impact plus réduit, tandis que le profil de vitesse n'a eu aucune influence sur la perception des utilisateurs. L'absence d'influence du profil de vitesse est probablement due à des différences trop subtiles dans les mouvements ou à la trajectoire spécifique utilisée dans notre cas d'étude (contour d'une feuille, points d'arrêt).

L'une des premières raisons à cette préférence est l'aspect naturel du mouvement. Les mouvements souples des robots ont en effet toujours été perçus comme naturels et non mécaniques, d'autant plus si l'effecteur était non rigide. Mais l'aspect naturel des mouvements ne peut pas expliquer à lui seul la préférence des utilisateurs (l'aspect souple de la base, quoique perçu comme naturel, n'a pas forcément été préféré des utilisateurs).

Cette préférence ne peut pas non plus être expliquée par l'aspect compétent des mouvements, puisqu'aucune différence n'a réellement été perçue concernant les questions liées à cette notion.

Ce sont plutôt l'aspect humain et l'impression de sécurité qui peuvent expliquer la préférence des utilisateurs. En effet, les mouvements ayant un effecteur souple sont les seuls à avoir été perçus comme relativement plus humains, moins agressifs et plus relaxants. Cette étude, en plus de déterminer la préférence des utilisateurs pour des mouvements souples au niveau de l'effecteur, a ainsi pu en dessiner les raisons possibles : l'aspect humain du mouvement, l'impression de sécurité via un aspect non agressif et relaxant.

Ces résultats sont cependant à nuancer par le fait que les mouvements des robots peuvent être contraints par certaines variables en environnement industriel : cadence de travail, orientation de l'effecteur pour la tâche à effectuer. Ces contraintes peuvent empêcher les mouvements de paraître plus naturels et plus humains, notamment en empêchant de générer de l'inertie sur l'effecteur. De plus, notre étude a été menée en environnement virtuel sur un cas bien précis (robot 7 axes, contour d'une feuille d'étanchéité). Il serait intéressant de procéder à des expéri-

mentations supplémentaires, en modifiant l'apparence et la structure du robot et en proposant des trajectoires différentes, éventuellement en environnement réel (avec des robots physiques).

6.4 Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons abordé une première étape primordiale dans l'étude de la collaboration homme-robot : la coprésence entre un homme et un robot. L'étude de l'acceptabilité doit en effet s'intéresser à des notions de partage d'espace avant de considérer des situations plus complexes.

Nous avons présenté un premier cas d'étude de coprésence homme-robot, dans lequel un opérateur et un robot doivent travailler côte à côte sur des portes de chaînes de montage. L'opérateur et le robot peuvent travailler de manière éloignée ou alors de manière rapprochée, essentiellement lorsque l'opérateur doit monter des pièces proches de la zone de travail du robot. Le robot peut détecter la proximité de l'opérateur à ses côtés (capteurs capacitifs et tactiles) et stopper son activité si besoin.

Une première expérimentation a permis d'étudier la manière dont l'opérateur et le robot se partagaient l'espace de travail. Un scénario de montage de porte en coprésence avec le robot a été spécifiquement conçu pour cette étude. Deux configurations de travail ont été comparées : l'une où les postes de l'opérateur et du robot étaient éloignés et l'autre où les postes se chevauchaient et autorisaient le contact avec le robot. Cette comparaison a été menée en environnements réel et virtuel. Les résultats ont montré que les opérateurs se sentaient plus contraints dans une configuration proche du robot et devaient mieux s'adapter pour gérer leurs tâches. La configuration proche du robot a également engendré plus de stress de la part des opérateurs. La comparaison réel-virtuel a permis de déterminer que les réponses aux questionnaires étaient similaires dans les deux situations, mais que le niveau de stress n'augmentait qu'en environnement réel : les opérateurs étaient moins conscients de la présence du robot en environnement virtuel.

Une deuxième expérimentation plus théorique a été menée pour étudier les caractéristiques des mouvements du robot. Plusieurs profils de mouvements ont été déterminés et comparés au cours de tests utilisateurs. Les utilisateurs devaient comparer des mouvements de test à un mouvement de référence. Les résultats ont montré que les utilisateurs préféraient des robots ayant un aspect souple au niveau de l'effecteur. Les mouvements de ces robots étaient perçus comme plus naturels, plus humains et donnaient une meilleure impression de sécurité. Ce résultat peut servir de conseil dans la programmation des robots (en environnements réel et virtuel) pour que leurs mouvements soient acceptables auprès de personnes situées à proximité.

Chapitre 7

Etude de la collaboration homme-robot

A l'opposé du chapitre précédent focalisé sur la coprésence homme-robot, nous nous intéressons dans ce chapitre à la collaboration homme-robot avec des configurations où un opérateur et un robot doivent travailler face à face sur des pièces communes. Dans cet objectif, nous avons mis en place deux expérimentations. Une première expérimentation, menée en environnement virtuel, a permis d'étudier l'impact de l'apparence et du profil des mouvements des robots sur la perception des utilisateurs. Une deuxième expérimentation, menée en environnements réel et virtuel, s'est intéressée à l'étude de la distribution temporelle des tâches entre un opérateur et un robot.

7.1 De la coprésence vers la collaboration homme-robot

La coprésence homme-robot représente une première étape dans la collaboration homme-robot : afin de collaborer ensemble, l'opérateur et le robot doivent avant tout partager le même espace physique. Il est donc pertinent de commencer par considérer les configurations de coprésence homme-robot dans l'étude de l'acceptabilité : les configurations des chaînes de montage se prêtent bien à cette étude. Dans ces configurations, la distribution temporelle des tâches entre l'opérateur et le robot est simple : les opérations se font de manière indépendante.

Cependant, la collaboration homme-robot peut également faire intervenir des situations qui vont au-delà du simple partage d'espace entre un homme et un robot et qui possèdent des distributions temporelles plus complexes. Dans certaines situations, l'opérateur et le robot doivent travailler ensemble sur des tâches communes et se partager les opérations de manière asynchrone (à tour de rôle) ou synchrone (en même temps). Dans ces situations, l'opérateur et le robot sont généralement situés face à face : le robot fournit des pièces à l'opérateur et l'assiste dans certaines tâches.

En usine automobile, certains postes correspondent bien à ces configurations (voir Figure 7.1) : ce ne sont plus des postes de chaînes de montage, mais des « îlots » situés en bord de ligne, destinés à la préparation de pièces automobiles (qui sont ensuite apportées sur les chaînes de montage). Ces configurations se rapprochent également des postes de *kitting*, destinés à la préparation de *kits* de montage (des boîtes à compartiments regroupant diverses pièces de montage).

Sur les postes de préparation manuels, le rôle de l'opérateur est de récupérer chaque pièce nécessaire parmi des étagères, de les préparer (assemblage, placement dans des compartiments)

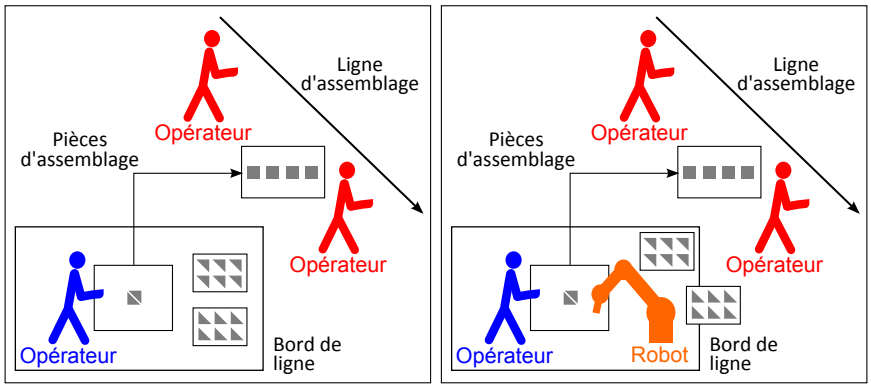


FIGURE 7.1 – La préparation de pièces de montage en bord de ligne : une configuration avec un opérateur seul et une configuration de collaboration homme-robot

et de les envoyer sur la ligne. Plusieurs problématiques, liées à la logistique et à la préparation des pièces, interviennent sur ces postes. Au niveau logistique, la circulation des pièces entre le bord de ligne et la ligne elle-même est aujourd'hui traitée par des convoyeurs contrôlés manuellement. Dans un contexte de l'usine du futur grandissant, il est dorénavant de plus en plus envisagé de faire automatiser ces transports par des robots mobiles autonomes. Au niveau du poste de préparation, le nombre très important de pièces disponibles dans les étagères impose deux contraintes majeures aux opérateurs :

- Le choix des pièces nécessaires n'est pas facile et peut engendrer une charge cognitive à l'opérateur ;
- Le temps de déplacement pour récupérer chaque pièce est parfois important.

Dans ce contexte, l'intervention d'un robot fournissant les pièces à l'opérateur pourrait soulager sa tâche et faire gagner du temps dans la préparation. On peut ainsi envisager des configurations où l'opérateur et le robot sont face à face (voir Figure 7.1) : le robot fournit les pièces et l'opérateur les prépare, éventuellement assisté par le robot. Les facteurs influençant l'acceptabilité d'une telle configuration de collaboration homme-robot, toujours du point de vue des opérateurs, sont multiples. Ils peuvent être liés au robot : apparence, mouvements, comportement. Ils peuvent aussi être liés à la manière de collaborer entre l'opérateur et le robot : degré d'interaction, niveau de contrôle du robot, distribution temporelle des tâches entre l'opérateur et le robot.

Dans ce chapitre, nous présentons deux cas d'étude focalisés sur la collaboration homme-robot et qui mettent en place des configurations où un opérateur et un robot doivent travailler face à face sur des pièces communes. Le premier cas d'étude est une tâche ordinaire d'échange d'objets. Une expérimentation a permis d'étudier, uniquement en environnement virtuel, l'influence de l'apparence et des profils de mouvements sur la perception des utilisateurs. Le deuxième cas d'étude représente une tâche plus concrète d'assemblage de pièces automobiles dans laquelle le robot assiste l'opérateur avec différents niveaux d'interaction. Une expérimentation a été menée à la fois en environnements réel et virtuel.

7.2 Etude de l'apparence et des mouvements

Le premier cas d'étude envisagé sur la collaboration a été mis en place spécifiquement pour étudier l'influence de plusieurs apparences de robots et de plusieurs profils de mouvements sur

la perception des utilisateurs. Les utilisateurs devaient collaborer avec différents robots ayant des profils de mouvements différents. Afin que les utilisateurs ne soient pas entièrement focalisés sur la tâche de collaboration mais puissent observer les robots et leurs mouvements, une tâche délibérément simple a été choisie : un échange d'objets entre le robot et l'utilisateur.

Dans ce cas d'étude, les utilisateurs étaient globalement passifs (observation de robots) avec relativement peu d'interaction (échange de cubes). Il ne semblait donc pas nécessaire de confronter les utilisateurs à des situations à la fois réelles et virtuelles. Le cas d'étude a ainsi été implémenté uniquement en environnement virtuel. L'objectif sous-jacent de ce cas d'étude était également de servir de pré-expérimentation pour le cas d'étude suivant, mettant en œuvre une situation de collaboration face à face mais sur un scénario plus concret.

Les résultats issus de ce cas d'étude ont fait l'objet d'une publication présentée à la conférence ACM VRST (Virtual Reality Software and Technology) en octobre 2013 à Singapour [Weistroffer *et al.*, 2013].

7.2.1 Mise en place

7.2.1.1 Tâche de collaboration

La tâche de collaboration consiste en un échange d'objets. Le robot et l'utilisateur sont situés de part et d'autre d'une table (voir Figure 7.2). Des cubes de couleur (4 cubes rouges et 4 cubes bleus) sont placés devant le robot et des zones de stockage sont présentes devant l'utilisateur. Le robot doit prendre un à un les cubes situés face à lui et les tendre à l'utilisateur. De son côté, l'utilisateur récupère les cubes proposés par le robot et les stocke dans la zone correspondante (à gauche pour les cubes bleus, à droite pour les cubes rouges). Pour donner un peu d'enjeu à la tâche de collaboration, l'ordre des cubes disposés devant le robot est aléatoire (ordre des couleurs) et le robot prend les cubes au hasard.

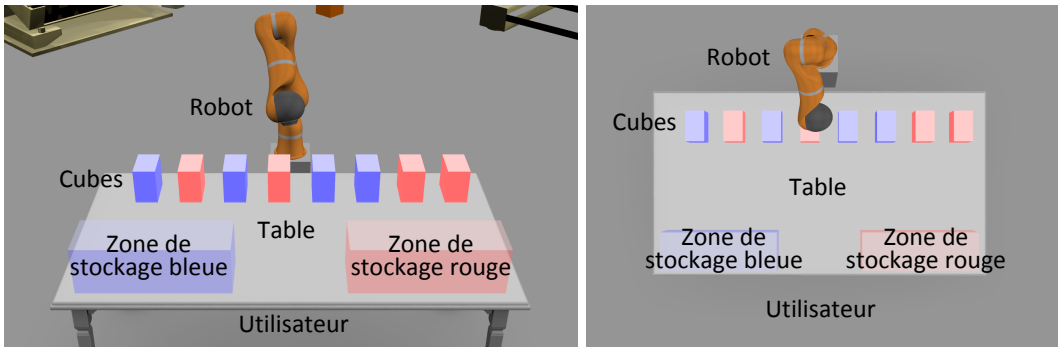


FIGURE 7.2 – La tâche d'échange d'objets (vue de face et vue de haut)

La tâche du robot s'effectue en trois étapes (voir Figure 7.3) : prendre un cube, le tendre à l'utilisateur et revenir en position de repos. Le robot revient en position de repos dès que le cube a été pris par l'utilisateur. Le robot propose ensuite un nouveau cube dès que le cube précédent a été stocké.

7.2.1.2 Apparences des robots

Nous voulions étudier l'impact de l'apparence des robots sur la perception des utilisateurs au cours de la tâche de collaboration. Nous avons ainsi utilisé plusieurs robots issus du milieu

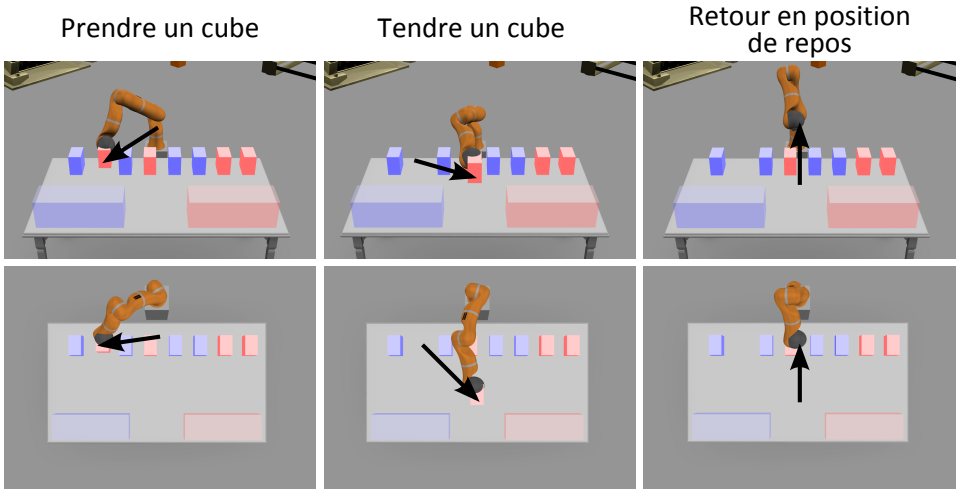


FIGURE 7.3 – Les trois étapes de la tâche du robot : prendre un cube, le tendre à l'utilisateur et revenir en position de repos

industriel ayant des apparences et des niveaux d'anthropomorphisme différents (voir Figure 7.4). Le robot R_0 (Universal UR10, 6 axes) est un robot léger et simple d'utilisation au niveau de sa programmation. Le robot R_1 (Kuka KR5SI, 6 axes) est un robot augmenté de mousses protectrices (capteurs capacitifs et tactiles). Le robot R_2 (Kuka LWR, 7 axes) est un robot proche de la configuration d'un bras humain (nombre de degrés de liberté, redondance du septième axe) et intrinsèquement sécurisé. Enfin, le robot R_3 (Motoman SDA10, 15 axes) est un robot bi-bras proche de l'apparence d'un humain.

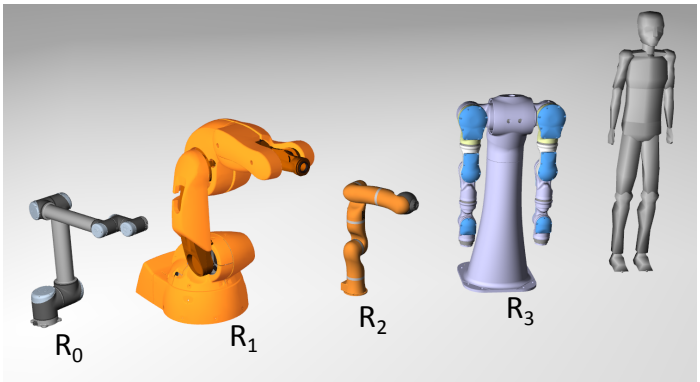


FIGURE 7.4 – Les robots utilisés pour la tâche d'échange d'objets (l'avatar humanoïde permet de se représenter la taille de chaque robot)

7.2.1.3 Mouvements des robots

En plus de l'apparence des robots, nous voulions étudier l'influence du profil de leurs mouvements sur la perception des utilisateurs. Nous voulions notamment comparer des mouvements proches de ceux d'une machine (M_1) et des mouvements proches de ceux d'un humain (M_2) et déterminer lesquels étaient les mieux perçus des utilisateurs.

Pour obtenir des mouvements proches d'une machine, nous avons utilisé des trajectoires rectilignes uniformes (voir Figure 7.5). L'effecteur des robots se déplaçait de manière rectiligne à vitesse constante pour atteindre les cubes, les tendre à l'utilisateur et revenir en position de repos.

Pour obtenir des mouvements proches d'un humain, nous aurions pu utiliser les heuristiques du mouvement humain présentées dans la Section 5.1.4.3 du Chapitre 5 et implémentées avec l'entreprise SpirOps. Au moment de la mise en place de cette expérimentation, le choix et l'implémentation de ces heuristiques n'avaient cependant pas encore été effectués (cette expérimentation sur l'apparence et les mouvements des robots a en réalité été effectuée au début de la thèse). L'utilisation de ces heuristiques pourra faire l'objet de travaux futurs. Pour cette étude, nous avons ainsi décidé de capturer les mouvements de la main d'une personne.

Dans la salle immersive de l'école des Mines, nous avons placé une personne dans l'environnement virtuel à la place du robot. Cette personne devait effectuer des tâches de pointage correspondant aux trajectoires du robot : atteindre la position d'un cube, atteindre la position d'échange du cube, atteindre la position de repos. Chacune de ces positions était représentée dans l'espace par une sphère de 5 cm de diamètre (20 cm pour la position d'échange, pour accorder plus de variabilité dans la précision des mouvements). La personne portait des lunettes de stéréoscopie active pour voir la scène en relief, son point de vue était suivi ainsi que sa main dominante à l'aide de capteurs et de caméras infrarouges. La main de la personne était représentée par une sphère blanche de 5 cm de diamètre. Pour chaque cube, deux étapes dans la trajectoire étaient enregistrées : la prise et l'échange du cube et le retour en position de repos. Au total, un ensemble de 16 trajectoires (2 étapes $\times$ 8 cubes) a ainsi été enregistré et réutilisé pour contrôler les robots R_0, R_1 et R_2 (voir Figure 7.5).

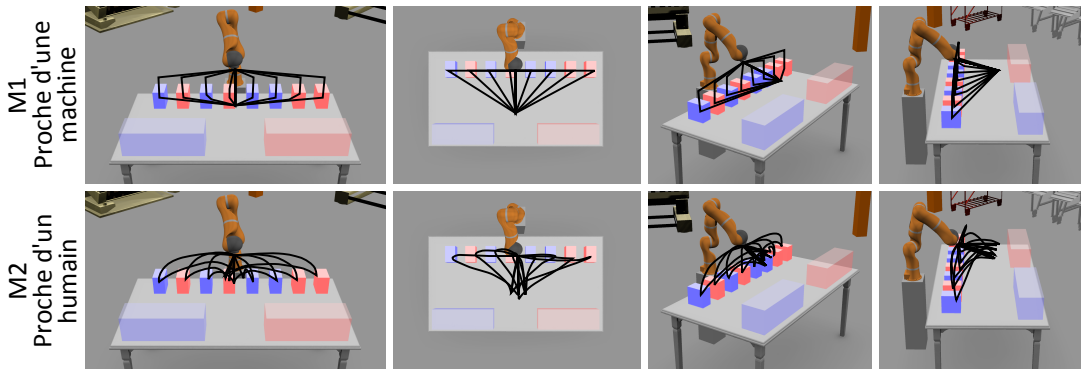


FIGURE 7.5 – Les trajectoires utilisées pour les robots R_0, R_1 et R_2

Le robot R_3 ayant une structure différente des autres robots (avec deux bras), des trajectoires légèrement différentes ont été générées pour ce type de robot (voir Figure 7.6). Chaque bras du robot s'occupait d'une moitié de la table : le bras droit prenait les cubes de droite tandis que le bras gauche prenait les cubes de gauche. Les positions de repos et d'échange des objets étaient également légèrement décalées pour chaque bras par rapport au centre de la table. Pour les mouvements proches d'une machine, les trajectoires étaient toujours rectilignes uniformes entre les différents points. Pour les mouvements proches d'un humain, un ensemble supplémentaire de trajectoires issues de la capture de la main d'une personne a été enregistré.

Les mouvements des robots étaient contrôlés par les algorithmes de cinématique inverse décrits dans la Section 5.1.3 du Chapitre 5 et implémentés directement dans le logiciel de réalité

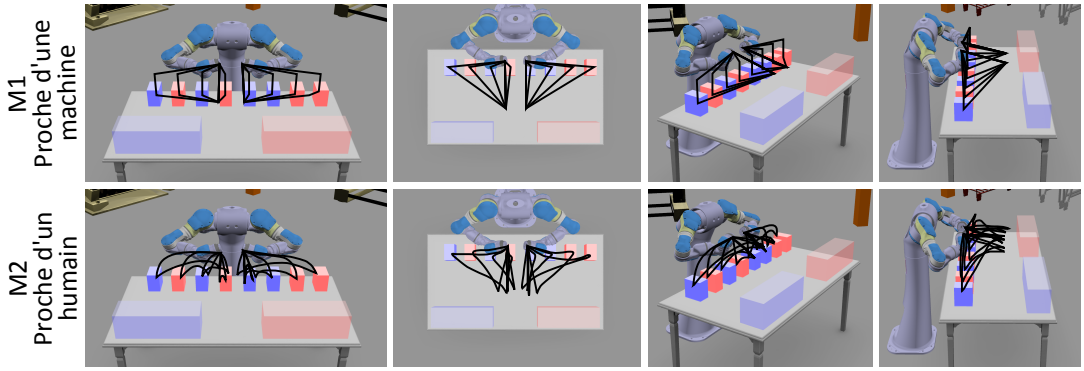


FIGURE 7.6 – Les trajectoires utilisées pour le robot bi-bras R_3

virtuelle Virtools. Les effecteurs des robots suivaient ainsi des repères 3D dans l'environnement virtuel. La manière dont ces repères 3D se déplaçaient dans l'espace influençait le profil des mouvements des robots. Afin que les mouvements des robots soient proches de ceux d'une machine, les repères 3D se déplaçaient selon les trajectoires rectilignes précédemment définies. Pour que les mouvements des robots soient proches de ceux d'un humain, les repères 3D suivaient les trajectoires issues de la capture de la main d'une personne.

7.2.1.4 Implémentation

Le cas d'étude a été mis en place entièrement en environnement virtuel dans la salle immersive de l'école des Mines (voir Figure 7.7). Les utilisateurs étaient assis face à un écran rétroprojeté (3,1 m × 1,7 m). Ils pouvaient observer l'environnement en relief (lunettes stéréoscopiques actives). Des caméras infrarouges ARTrack permettaient de suivre en temps réel le point de vue (capteur sur les lunettes) et la main dominante des utilisateurs (capteur sur la main) pour interagir avec les cubes et les robots. La main non-dominante des utilisateurs reposait immobile sur l'accoudoir de la chaise et servait à recueillir des mesures physiologiques en temps réel pendant la tâche (rythme cardiaque, conductance de la peau).

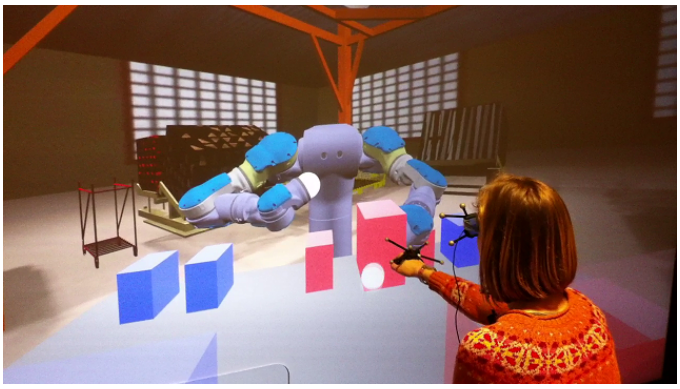


FIGURE 7.7 – Les tests utilisateurs dans la salle immersive de l'école des Mines

La manière d'interagir avec les cubes et avec les robots était simplifiée. Le robot attrapait des cubes en les touchant avec son effecteur. De la même manière, l'utilisateur prenait les cubes tendus par le robot en approchant simplement la main : une collision était détectée entre la

main de l'utilisateur (représentée par une sphère de 5 cm de diamètre) et le cube. Une fois les cubes déposés dans les zones de stockage, il était impossible de les récupérer (même s'ils étaient placés du mauvais côté).

7.2.2 Tests utilisateurs

7.2.2.1 Protocole

L'objectif des tests était d'évaluer l'impact de l'apparence des robots et de leurs mouvements sur la perception des utilisateurs lors de la tâche de collaboration. Les apparences des robots à comparer étaient R_1, R_2 et R_3 (R_0 servait uniquement à l'entraînement des utilisateurs). Pour chaque apparence de robot, deux profils de mouvements devaient être comparés : proche d'une machine (M_1) et proche d'un humain (M_2). Ainsi, chaque utilisateur devait tester en tout 6 conditions et répéter la tâche de collaboration trois fois pour chacune des conditions.

Le protocole des tests est représenté dans le Tableau 7.1. Le début des tests commençait par une session d'entraînement avec le robot R_0 doté des mouvements M_1. Puis les différentes conditions étaient proposées aux utilisateurs. Pour chaque robot, les utilisateurs testaient les deux conditions de mouvements l'une à la suite de l'autre (selon un ordre aléatoire). Une fois les deux conditions de mouvements testées, le robot suivant était présenté aux utilisateurs (selon un ordre aléatoire). Le besoin de regrouper les deux conditions de mouvements par robot est dû au fait que les différences étaient parfois subtiles à déceler et à mémoriser.

Etape	Entraînement	Test 1			Test 2			Test 3			
Robots	Robot 0	Robot 3			Robot 1			Robot 2			
Mouvements	M1	M1	M2	Q_M	M2	M1	Q_M	M2	M1	Q_M	Q_R
Répétitions	1	3	3		3	3		3	3		

TABLE 7.1 – Un exemple de déroulement des tests pour un utilisateur

La totalité des tests durait environ 45 minutes par utilisateur. 20 personnes ont participé à l'étude. Ces personnes provenaient de l'école des Mines et l'âge moyen était de 26 ans (de 19 à 32 ans).

7.2.2.2 Questionnaires

Après avoir testé les deux conditions de mouvements pour un robot donné, les utilisateurs devaient répondre à un questionnaire Q_M avant de passer au robot suivant. Ce questionnaire permettait de comparer les deux types de mouvements et posait des questions relatives au niveau d'anthropomorphisme, au niveau de compétence, à l'anxiété ressentie, à la sécurité perçue et à l'impression générale des mouvements (voir Tableau 7.2). Pour chaque question, les utilisateurs devaient noter chaque mouvement sur une échelle de 1 à 6.

Un questionnaire Q_R était posé à l'issue de la totalité des tests afin de comparer les différentes apparences des robots. Ce questionnaire était similaire à celui sur les mouvements et demandait aux utilisateurs de noter chaque robot sur une échelle de 1 à 6 concernant leur niveau d'anthropomorphisme, leur compétence, le niveau d'anxiété et de sécurité perçue et l'impression générale (voir Tableau 7.3).

Thèmes	Questions	Réponses			Mvt 1	Mvt 2
Anthropo.	Les mouvements vous semblent-ils plutôt...	Proches d'une machine	1 <-> 6	Proches d'un humain		
Compétence	Le robot vous semble-t-il plutôt...	Incompétent	1 <-> 6	Compétent		
Relaxation	Vous-êtes-vous senti plutôt...	Anxieux	1 <-> 6	Décontracté		
Sécurité	Vous-êtes-vous senti plutôt...	En insécurité	1 <-> 6	En sécurité		
Impression	Quelle est votre impression à propos des mvts ?	Désagréable	1 <-> 6	Agréable		

TABLE 7.2 – Le questionnaire Q_M sur les mouvements des robots (posé pour chaque robot)

Thèmes	Questions	Réponses			Robot 1	Robot 2	Robot 3
Anthropo.	Le robot vous semble-t-il plutôt...	Proche d'une machine	1 <-> 6	Proche d'un humain			
Compétence	Le robot vous semble-t-il plutôt...	Incompétent	1 <-> 6	Compétent			
Relaxation	Vous-êtes-vous senti plutôt...	Anxieux	1 <-> 6	Décontracté			
Sécurité	Vous-êtes-vous senti plutôt...	En insécurité	1 <-> 6	En sécurité			
Impression	Quelle est votre impression à propos du robot ?	Désagréable	1 <-> 6	Agréable			

TABLE 7.3 – Le questionnaire Q_R sur l'apparence des robots

7.2.2.3 Mesures physiologiques

Pour estimer l'état affectif des utilisateurs, des mesures physiologiques étaient acquises continuellement pendant la totalité des tests sur leur main non-dominante (immobile pendant les tests). Pour chaque tâche (échange de 8 cubes), les indicateurs utilisés étaient la moyenne du rythme cardiaque, la moyenne de la conductance de la peau et la fréquence des pics de conductance. Nous avons fait l'hypothèse que le rythme cardiaque permettait de renseigner sur l'intensité de la tâche, c'est-à-dire le niveau de concentration des utilisateurs et le stress ressenti. Des variations du rythme cardiaque permettaient de déterminer des influences éventuelles de l'apparence et des mouvements des robots. Le niveau de conductance de la peau était lié au stress des utilisateurs : un niveau plus élevé pour certaines conditions permettait de déterminer si une apparence ou des mouvements particuliers étaient plus stressants pour les utilisateurs. Enfin, la fréquence des pics de conductance pouvait rendre compte de la réaction à certains événements lors de la tâche. Au repos, des pics de conductance surviennent spontanément à une fréquence d'environ 2 ou 3 par minute et cette fréquence augmente lors d'activités physiques ou lors de l'observation de certains événements. Lors de l'interaction avec les robots, une hausse de la fréquence des pics de conductance pouvait signifier une réaction plus importante au comportement et aux mouvements du robot.

7.2.3 Résultats du questionnaire sur l'apparence

Le questionnaire Q_R était posé à l'issue de la totalité des tests et demandait de noter chaque robot (sur une échelle de 1 à 6) concernant les notions d'anthropomorphisme, de compétence, de relaxation, de sécurité et d'impression générale. Les moyennes des réponses au questionnaire Q_R sont représentées sur la Figure 7.8. Des tests de Friedman ont été menés pour déceler les différences significatives pour chaque question et des tests de Wilcoxon ont été utilisés pour analyser les différences entre les robots (comparaisons 2 à 2). Les résultats des tests statistiques sont disponibles en Annexe D.

Des différences significatives ont été perçues entre les robots pour les notions d'anthropomorphisme ($p < 10^{-3}$), de relaxation ($p < 10^{-3}$), de sécurité ($p < 10^{-3}$) et d'impression générale

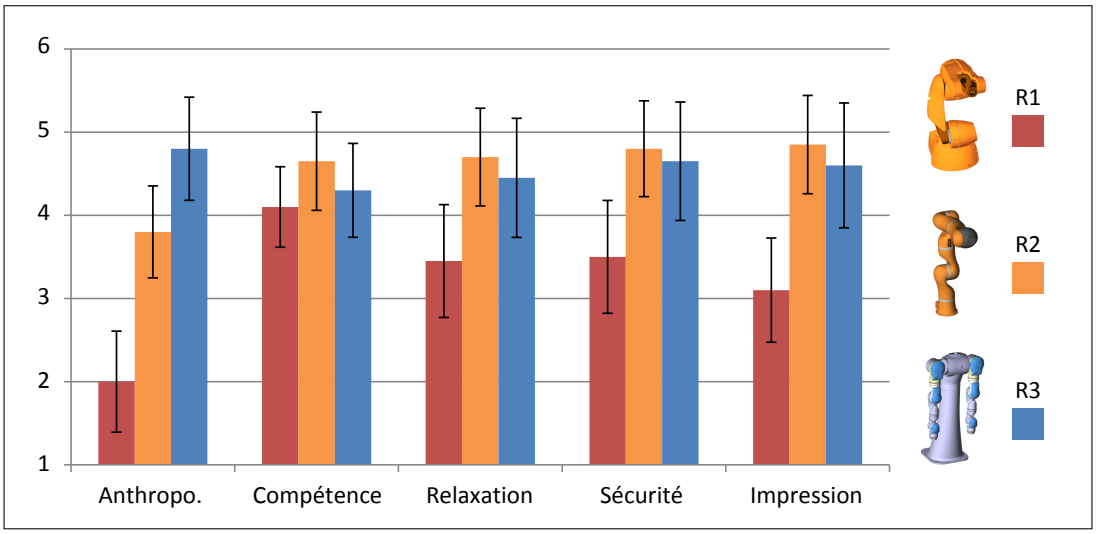


FIGURE 7.8 – Les résultats du questionnaire Q_R sur l'apparence

($p < 10^{-3}$). Aucune différence n'a été perçue entre les robots pour la notion de compétence.

7.2.3.1 Anthropomorphisme

Globalement, les trois robots ont été perçus comme ayant des degrés d'anthropomorphisme différents les uns des autres (les tests de Wilcoxon montrent des différences entre les trois robots). Le robot R_1 a été perçu le moins anthropomorphe des trois (note moyenne de 2). Les utilisateurs ont trouvé son apparence souvent imposante et plus proche du domaine industriel. Le robot R_2 a obtenu une note intermédiaire (3,8). Sa configuration proche d'un bras humain et son aspect lisse ont influencé les impressions des utilisateurs, qui ont souvent comparé son apparence à celle d'un animal (serpent, chien). Le robot R_3 a été perçu le plus anthropomorphe (note moyenne de 4,8). Avec sa configuration à deux bras, les utilisateurs ont rapidement assimilé l'apparence de ce robot à celle d'un être humain. Ces résultats correspondent bien à nos attentes (degré d'anthropomorphisme croissant de R_1 à R_3).

7.2.3.2 Compétence

Aucune différence significative n'a été trouvée entre les robots concernant leur niveau de compétence perçu. La tâche du robot étant simple à réaliser, les utilisateurs ont trouvé qu'elle était effectuée correctement à chaque fois par chaque robot. Ainsi, l'apparence des robots n'a pas eu d'influence sur le niveau de compétence perçu.

7.2.3.3 Relaxation, sécurité et impression générale

Les résultats du questionnaire pour la relaxation, la sécurité et l'impression générale sont intéressants à étudier : des différences significatives ont été décelées entre R_1 et R_2 et entre R_1 et R_3, mais pas entre R_2 et R_3. Le robot R_1 a effectivement obtenu les notes les plus basses pour ces notions (moins de 3,5), tandis que les robots R_2 et R_3 ont obtenu des notes plus élevées (plus de 4,5).

Les différents degrés d'anthropomorphisme des robots peuvent expliquer ces différences. Le robot R_1 ayant été considéré d'apparence plus industrielle et moins anthropomorphe, les uti-

lisateurs se sont sentis moins en confiance : ils se sont dits plus tendus, se sentaient moins en sécurité et avaient une mauvaise impression du robot. En revanche, bien que les robots R_2 et R_3 aient été notés différemment sur l'anthropomorphisme, ces deux robots ont obtenu des résultats similaires sur les niveaux de relaxation, de sécurité et d'impression. Ainsi, il suffit que le robot soit considéré un minimum anthropomorphe (comme R_2) pour qu'il soit perçu positivement des utilisateurs (au même niveau qu'un robot complètement anthropomorphe comme R_3).

On peut même noter que, en moyenne, le robot R_3 a obtenu des notes légèrement plus faibles que R_2. Certains utilisateurs étaient en effet souvent perturbés par l'apparence du robot R_3 qu'ils trouvaient trop proche d'un humain. Les utilisateurs ne savaient pas comment considérer ce robot (comme une machine ou comme un humain) et trouvaient que son apparence n'était pas forcément adaptée à la tâche. Cette tendance peut se rapprocher du phénomène de la vallée dérangeante (voir la Section 2.2.2.3 du Chapitre 2 [Mori, 1970]), qui stipule qu'un niveau trop élevé d'anthropomorphisme peut parfois nuire au degré de familiarité avec les utilisateurs.

7.2.4 Résultats du questionnaire sur les mouvements

Lors des tests pour un robot donné, les utilisateurs étaient invités à se focaliser sur les différences qu'ils pouvaient percevoir dans les mouvements du robot. Une fois que les utilisateurs avaient testé les deux conditions de mouvements (proches d'une machine M_1 et proches d'un humain M_2), le questionnaire Q_M leur était posé. Les utilisateurs devaient noter chaque mouvement (sur une échelle de 1 à 6) pour les notions d'anthropomorphisme, de compétence, de relaxation, de sécurité et d'impression générale.

Les moyennes des réponses sur tous les utilisateurs sont représentées sur la Figure 7.9. Des tests de Friedman ont été menés pour déceler les différences significatives pour chaque question et des tests de Wilcoxon ont été utilisés pour effectuer des comparaisons entre conditions 2 à 2. Les résultats des tests statistiques sont disponibles en Annexe D.

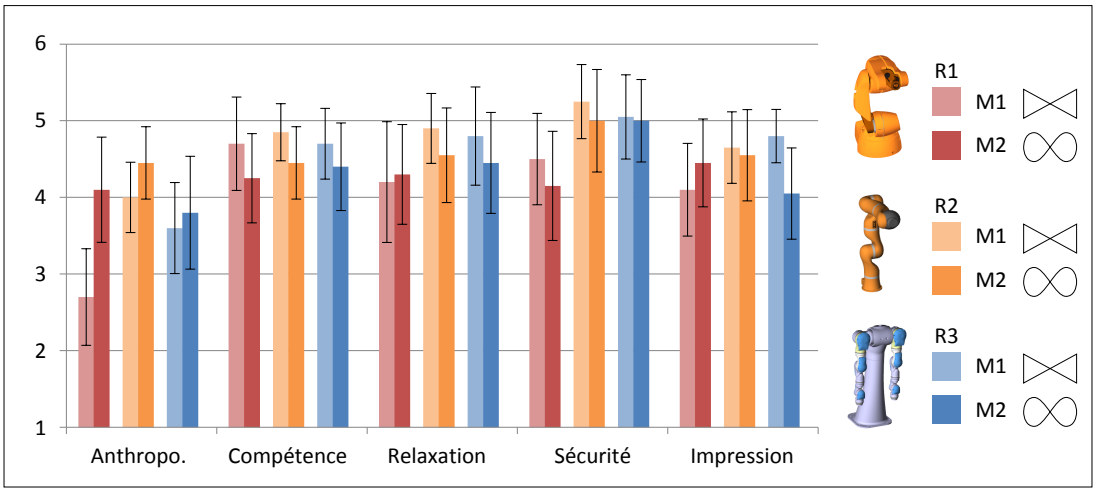


FIGURE 7.9 – Les résultats du questionnaire Q_M sur les mouvements

Des différences significatives ont été perçues entre les conditions pour les notions d'anthropomorphisme ($p = 0{,}005$), de sécurité ($p = 0{,}02$) et d'impression générale ($p = 0{,}08$).

Pour aider à analyser les résultats, un critère supplémentaire a été calculé pour rendre compte des différences de perception entre M_1 et M_2 pour chaque robot. Il s'agit de la valeur $\Delta = M_2 - M_1$ (différence des réponses au questionnaire). Si Δ est positif, alors les mouvements

proches d'un humain (M_2) ont été mieux perçus que les mouvements proches d'une machine (M_1) ; à l'inverse, si Δ est négatif, alors les mouvements M_1 ont été mieux perçus que les mouvements M_2. Ces valeurs sont représentées sur la Figure 7.10. Des tests de Friedman ont été menés pour déceler les différences significatives entre robots pour chaque question. Des tests de Wilcoxon ont été utilisés pour comparer chaque robot 2 à 2. Les résultats des tests statistiques sont disponibles en Annexe D.

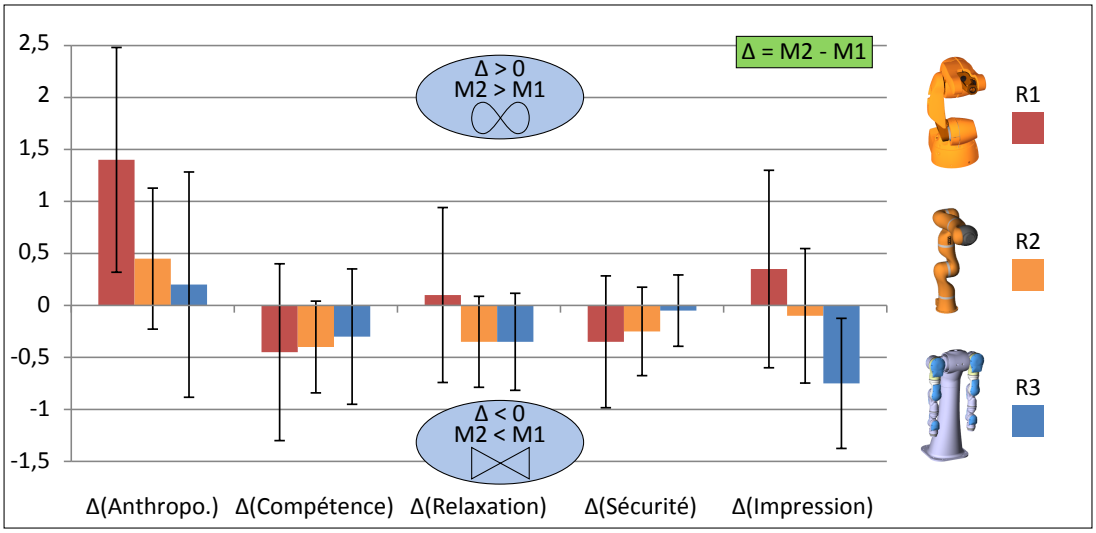


FIGURE 7.10 – Les résultats du questionnaire Q_M par différence de mouvements ($\Delta = M_2 - M_1$)

7.2.4.1 Anthropomorphisme

Globalement, pour chaque robot, les mouvements M_2 ont toujours été perçus plus anthropomorphes que les mouvements M_1 ($\Delta > 0$, voir Figure 7.10). Ceci conforte notre approche, qui était de capturer les trajectoires d'une main humaine pour générer des mouvements proches d'un humain.

Cependant, cette différence n'a pas été perçue avec la même intensité pour chaque robot. En effet, la différence de perception entre M_1 et M_2 est significative pour R_1, mais pas pour R_2 et R_3. Sur la Figure 7.10, on peut voir que plus le robot est d'apparence anthropomorphe, moins la différence d'anthropomorphisme entre M_1 et M_2 est perçue.

Le fait que le robot R_1 ait été perçu comme ayant une apparence fortement industrielle a probablement joué dans cette tendance. Les robots R_2 et R_3 étant anthropomorphes, les utilisateurs se sont focalisés sur leur apparence, ce qui a atténué les différences de perception entre M_1 et M_2. Au contraire, l'apparence plus industrielle du robot R_1, ainsi que sa configuration simple (6 axes), ont probablement mis en valeur ces différences.

Une seconde observation intéressante sur l'aspect anthropomorphe des mouvements concerne le niveau absolu des réponses au questionnaire (voir Figure 7.9). Globalement, ce sont les mouvements du robot R_2 qui ont obtenu les meilleures notes. Les mouvements du robot R_3 ont obtenu des notes légèrement plus faibles (même si les différences significatives sont faibles). Les mouvements M_1 du robot R_1 ont été notés le plus bas (2,7) et expliquent la plus grande partie des différences significatives avec les autres conditions.

7.2.4.2 Compétence, relaxation et sécurité

Très peu de différences ont été perçues entre les mouvements ($\Delta \approx 0$, voir Figure 7.10) pour chaque robot pour les notions de compétence, de relaxation et de sécurité perçue (pas de différences significatives). On peut cependant noter que, pour chaque robot, les mouvements proches d'un humain (M_2) ont toujours été perçus légèrement moins compétents, moins relaxants et moins sécurisants que les mouvements M_1. Les mouvements M_2 étant proches de ceux d'un humain (issus de la capture de mouvements d'une main), ces mouvements offraient une certaine variabilité dans les trajectoires et les vitesses utilisées, comparées aux trajectoires rectilignes à vitesse constante des mouvements M_1. Ceci a probablement rendu les mouvements M_2 moins prédictibles que M_1, ce qui a pu suggérer un niveau de compétence plus faible, et plus stressants pour les utilisateurs.

De plus, pour la relaxation et la sécurité perçue, les réponses pour le robot R_1 semblent légèrement plus faibles que pour les robots R_2 et R_3 (différence significative pour la sécurité, voir Figure 7.9) : les mouvements du robot R_1 ont globalement été perçus moins relaxants et moins sécurisants qu'avec les autres robots. Ces différences sont probablement dues seulement à l'apparence du robot R_1 qui était perçue peu relaxante et peu sécurisante.

7.2.4.3 Impression générale

Les réponses relatives à l'impression générale des mouvements sont intéressantes à analyser. Les mouvements proches d'un humain (M_2) n'ont pas toujours été le mieux perçus des utilisateurs. C'est le cas pour le robot R_1 ($\Delta > 0$), mais pas pour les robots R_2 et R_3 ($\Delta < 0$). En particulier, le Δ du robot R_1 est significativement différent de celui du robot R_3 ($p = 0{,}02$).

Ainsi, la différence de perception des mouvements était différente pour chaque robot. Pour le robot R_1 d'apparence industrielle, les utilisateurs ont faiblement préféré les mouvements anthropomorphes M_2. Pour le robot R_2 d'apparence anthropomorphe moyenne, les utilisateurs n'ont préféré ni les mouvements mécaniques, ni les mouvements humains. En revanche, pour le robot R_3 d'apparence anthropomorphe, les utilisateurs ont clairement préféré les mouvements mécaniques M_1 et rejeté les mouvements humains M_2. Ces mouvements ont en effet souvent perturbé les utilisateurs. Ils étaient perçus comme peu prédictibles et certains utilisateurs étaient gênés par l'aspect trop anthropomorphe des mouvements.

La trop forte impression d'anthropomorphisme au niveau de l'apparence et des mouvements du robot R_3 a probablement accentué l'effet de la vallée dérangeante : le robot R_3 était perçu comme trop proche d'un humain, ce qui perturbait les utilisateurs et les empêcher de discerner correctement le comportement du robot (comme celui d'une machine ou celui d'un humain).

7.2.5 Résultats des mesures physiologiques

Les indicateurs utilisés pour évaluer l'état affectif des utilisateurs étaient la moyenne du rythme cardiaque, la moyenne de la conductance de la peau et la fréquence des pics de conductance. Ces indicateurs étaient générés pour chaque tâche (échange de 8 cubes) puis normalisés entre une valeur minimale et une valeur maximale générées sur la totalité des tests (dépendantes de chaque utilisateur). Ainsi, pour chaque utilisateur, un ensemble de 18 indicateurs était généré (6 conditions $\times$ 3 répétitions) pour le rythme cardiaque moyen, la conductance moyenne de la peau et la fréquence des pics de conductance.

La Figure 7.11 représente la moyenne de chaque indicateur sur tous les utilisateurs pour chaque condition. Des analyses de variance à 2 variables (robots et mouvements) ont été menées

pour déceler les différences significatives dans les résultats (les résultats des tests sont disponibles en Annexe D).

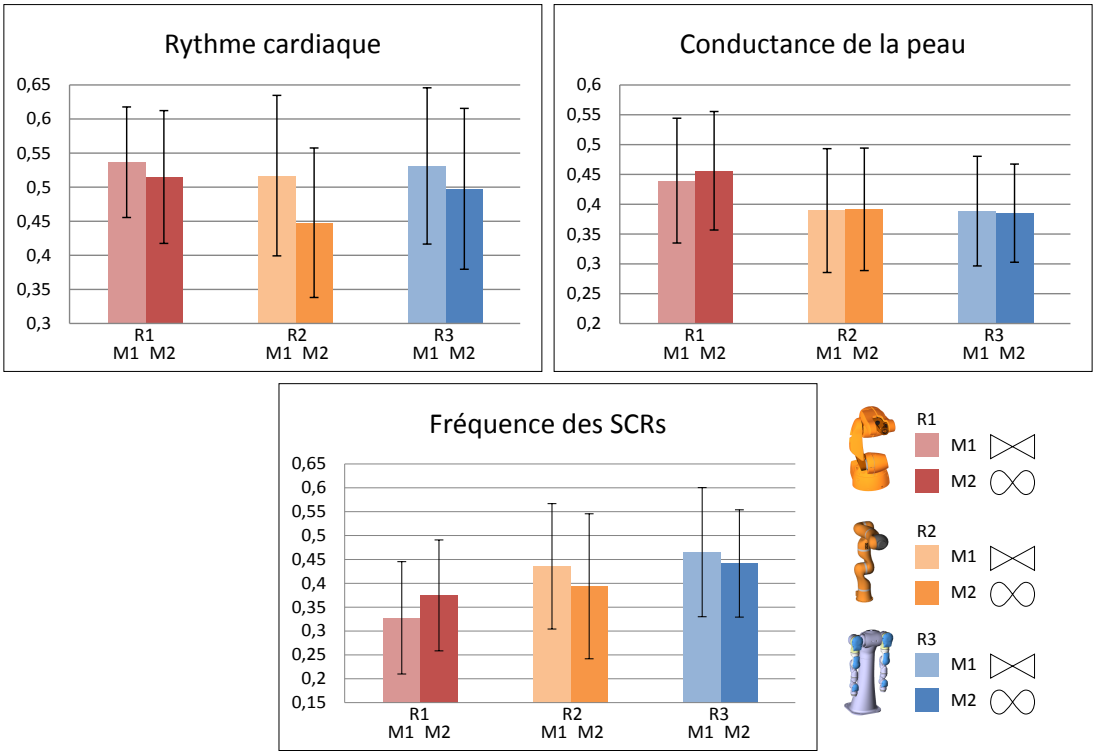


FIGURE 7.11 – Les résultats liés aux mesures physiologiques

Globalement, aucune différence significative n'a été décelée entre conditions dans les résultats liés aux mesures physiologiques. La première raison possible vient du fait que les tests ont été menés en environnement virtuel : les robots étaient virtuels, l'interaction entre les utilisateurs et les robots se faisait de manière simplifiée, sans danger physique pour les utilisateurs, qui se sentaient plus relaxés. De manière générale, les utilisateurs se sentaient ainsi en confiance dans l'environnement virtuel, sans différence notable entre conditions, d'où l'absence de différence significative dans les mesures physiologiques.

Cependant, il est possible qu'aucune différence significative n'ait été décelée même si les tests avaient été menés en environnement réel. En effet, la tâche choisie pour l'interaction avec les robots était simple et les différences entre les conditions étaient subtiles, notamment entre les mouvements M_1 et M_2 : la différence pouvait être perçue visuellement, mais elle était suffisamment faible pour ne pas engendrer de différences dans les mesures physiologiques. De plus, l'activité physique des utilisateurs était réduite : les utilisateurs étaient globalement passifs (mouvements du bras dominant en position assise) et l'interaction avec les robots était faible (échange d'objets en un point). Ces raisons sont aussi à prendre en compte pour expliquer l'absence de différence significative dans les mesures physiologiques.

Certains résultats intéressants peuvent cependant être esquissés à partir des mesures physiologiques. Notamment, le rythme cardiaque était légèrement plus élevé, pour chaque robot, lors de l'interaction avec les mouvements M_1 (proches d'une machine). Ceci semble rejoindre la notion de compétence du questionnaire Q_M sur les mouvements : les utilisateurs ont perçu les mouvements M_1 comme plus compétents. On pourrait donc penser que les mouvements M_1

ont incité les utilisateurs à s'impliquer plus dans la tâche et à être plus concentrés, ce qui a probablement fait augmenter leur rythme cardiaque.

Pour la conductance de la peau, le niveau moyen de SCL semble légèrement plus élevé avec le robot R_1 qu'avec les robots R_2 et R_3. Les utilisateurs semblaient donc plus stressés en présence du robot R_1. Ceci rejoint les résultats du questionnaire Q_R sur l'apparence qui ont montré que le robot R_1 avait obtenu les notes les plus basses pour la relaxation ressentie et la sécurité perçue.

Enfin, la fréquence des pics de conductance de la peau (SCRs) peut être un indicateur de l'intervention d'événements particuliers pendant les tests. Globalement, les résultats montrent une légère augmentation de la fréquence des SCRs avec l'aspect anthropomorphe des robots : plus le robot est anthropomorphe, plus la fréquence des SCRs augmente. Ainsi, des robots anthropomorphes ont suscité plus de réactions de la part des utilisateurs (bonnes ou mauvaises), qui les assimilaient sans doute plus à des humains.

7.2.6 Synthèse des résultats

Dans cette étude, nous nous sommes focalisés sur la perception de différentes apparences et différents mouvements de robots sur une tâche relativement simple en environnement virtuel.

Trois apparences de robots ont été comparées avec des niveaux d'anthropomorphisme différents. Il semble que les utilisateurs aient préféré interagir avec des robots d'apparence humaine plutôt qu'industrielle, en termes de relaxation, de sécurité et d'impression générale. Cependant, le robot d'apparence complètement anthropomorphe (à 2 bras) n'a pas forcément obtenu de meilleurs résultats qu'un robot d'apparence légèrement moins humaine. On peut aussi noter que l'apparence des robots n'a pas eu d'influence sur leur niveau de compétence perçu.

Pour chaque robot, deux types de mouvements ont été comparés : un profil plutôt mécanique et un profil plutôt humain. La perception de ces deux types de mouvements a été différente selon les robots, ce qui montre une influence entre l'apparence et les mouvements des robots. Il semble que plus le robot est d'apparence anthropomorphe, moins les mouvements humains sont appréciés.

Ces résultats ont été obtenus grâce aux réponses à des questionnaires. Des mesures physiologiques ont également été récoltées, mais aucune différence significative n'a été décelée dans les résultats. Ceci est probablement dû à la tâche de collaboration et à l'interaction simplifiée avec les robots pour cette étude. Le fait d'avoir mené cette étude en environnement virtuel peut également expliquer l'absence de différences significatives.

Dans une certaine mesure, les résultats de cette étude rejoignent les considérations de la vallée dérangeante. Ce concept stipule que le degré de familiarité avec un robot s'accroît au fur et à mesure que son apparence anthropomorphe augmente, jusqu'à atteindre un certain point (la vallée dérangeante) où l'apparence du robot devient trop perturbante : la distinction entre robot et humain n'est plus si claire et certains détails nuisent à la bonne appréciation du robot. Il nous semble avoir observé ce phénomène dans notre étude, notamment avec les mouvements anthropomorphes du robot bi-bras : ces mouvements ont perturbé certains utilisateurs sans qu'ils puissent réellement expliquer pourquoi. Il semble donc que l'effet de la vallée dérangeante soit également présent avec des robots industriels.

7.3 Etude de la distribution temporelle

Le cas d'étude précédent se focalisait sur l'étude de l'apparence et des profils de mouvements des robots avec une tâche de collaboration homme-robot relativement simple (échange d'objets).

Au-delà de l'apparence et des mouvements des robots, des facteurs supplémentaires peuvent avoir un impact plus fort sur l'acceptabilité de la collaboration homme-robot : le degré d'interaction avec le robot, le contrôle du comportement du robot, la distribution temporelle des tâches. La distribution temporelle de la collaboration homme-robot représente la manière dont les tâches sont réparties entre l'opérateur et le robot : de manière asynchrone (pas d'opérations simultanées) ou synchrone (opérations simultanées dans le temps et l'espace de travail).

Afin d'étudier l'impact de ces facteurs (interaction, contrôle, distribution temporelle) dans l'évaluation de l'acceptabilité de la collaboration homme-robot, un nouveau cas d'étude a été mis en place en s'inspirant d'un poste réel de montage. Ce cas d'étude est fortement lié aux configurations de bord de ligne des usines automobiles. Le scénario mis en place est donc plus industriel et concret. Des pièces sont préparées sur un poste statique (en dehors des lignes d'assemblage) avant d'être envoyées aux opérateurs des lignes pour y être assemblées (voir Section 7.1).

7.3.1 Cas d'étude

7.3.1.1 Description

Le poste de montage concerne la préparation de raccords d'air de moteur en bord de ligne. Trois pièces sont nécessaires à l'assemblage (voir Figure 7.12) : un raccord d'air intérieur, un raccord d'entrée et un raccord de sortie. Les raccords d'entrée et de sortie doivent être emmanchés aux endroits correspondants sur le raccord intérieur, puis fixés définitivement en vissant les colliers situés aux interfaces. L'assemblage final est ensuite déposé par l'opérateur dans un bac situé à ses côtés (ou monté directement sur la ligne des moteurs en usine).

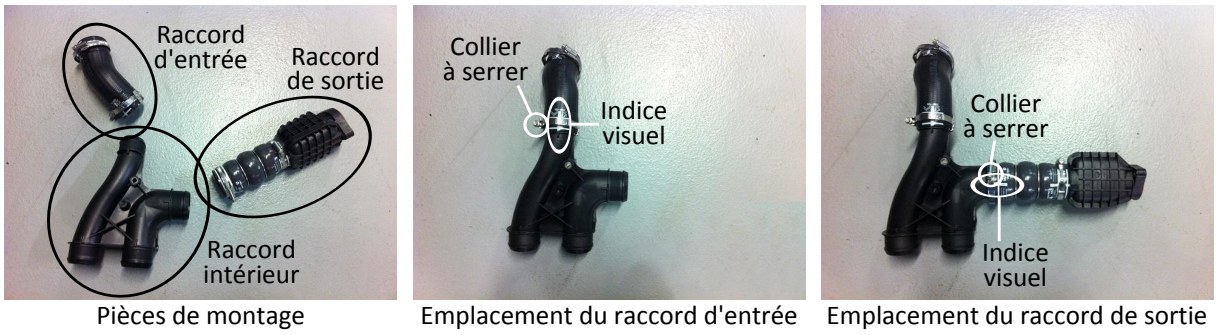


FIGURE 7.12 – Les pièces nécessaires à la préparation du raccord d'air

Sur le poste actuel en usine, la préparation des pièces se fait de manière entièrement manuelle : l'opérateur doit aller chercher chaque raccord individuellement et les assembler sur une table de préparation. Cette table est munie d'outils (gabarit, visseuse électrique) pour assister l'opérateur dans la préparation des pièces.

Sur le poste envisagé de collaboration homme-robot, l'opérateur est assisté par un robot. Ce robot est situé face à l'opérateur, lui fournit les différents raccords et vient éventuellement l'assister dans la préparation (maintien et rotation du raccord intérieur). Afin de se focaliser sur l'étude du degré d'interaction et de la distribution temporelle des tâches entre l'opérateur et le robot, plusieurs comportements du robot peuvent être envisagés : un premier comportement où le robot dépose simplement les pièces sur la table, un deuxième où le robot échange directement les pièces avec l'opérateur et enfin un troisième où l'opérateur travaille sur une pièce maintenue par le robot.

Alors que le cas d'étude sur la coprésence mettait en œuvre un robot d'apparence industrielle (le robot Kuka KR5SI), nous étions intéressés dans ce nouveau cas d'étude par confronter les opérateurs à un robot d'apparence anthropomorphe. De plus, afin de fournir facilement les pièces à l'opérateur, l'utilisation d'un robot muni de deux bras semblait plus pertinente et offrait plus de liberté dans les scénarios à tester. C'est donc le robot Motoman SDA20 qui a été choisi pour mettre en place ce cas d'étude : il s'agit d'un robot bi-bras d'apparence anthropomorphe.

Il est important de noter que ce robot (contrairement au robot Kuka KR5SI) ne dispose pas de fonctionnalités de sécurité intrinsèque : détection de la proximité de l'opérateur, détection de collision. Néanmoins, de par sa position, le robot ne pouvait atteindre les opérateurs qu'au bout de ses effecteurs et, vis-à-vis de sa programmation, le robot ne dépassait pas une certaine ligne indiquée sur la table. De plus, pendant les tests, un coordinateur était toujours présent avec un bouton d'arrêt d'urgence si un problème devait survenir. Dans la suite des travaux liés à la chaire (avec une thèse sur la reconnaissance des gestes de l'opérateur), l'objectif est d'améliorer ce cas d'étude par l'ajout de caméras supervisant la zone de travail.

Les trois types de raccords sont disposés sur des supports de chaque côté du robot (voir Figure 7.13) : le bras droit s'occupe d'apporter les raccords intérieurs, tandis que le bras gauche apporte les raccords d'entrée et de sortie. Afin de faciliter la programmation du robot et d'éviter l'utilisation d'un système de vision, les positions des pièces sur les supports sont prédéfinies. Au total, un ensemble de cinq pièces de chaque type peut être apporté sur la table. Ainsi, le scénario d'assemblage de base consiste en un cycle de cinq tâches de montage de raccords d'air.

Les différents raccords sont apportés par le robot au niveau des zones de dépôt définies en rouge sur la table (voir Figure 7.13). L'opérateur peut alors les récupérer et préparer la pièce finale. Une zone d'assemblage est définie en bleu sur la table : c'est la zone que l'opérateur peut utiliser pour assembler les pièces. Une ligne grise délimite l'espace que le robot n'atteint pas au cours de ses mouvements (vis-à-vis de sa programmation). Une visseuse électrique est présente sur le côté droit de la table pour le vissage des colliers, tandis que deux boutons sont disposés sur la gauche de l'opérateur : ils permettent de contrôler les étapes du robot (dépôt des pièces, voir plus loin Section 7.3.1.3). Enfin, un bac de dépôt est disponible sur la droite de l'opérateur pour y stocker les pièces terminées.

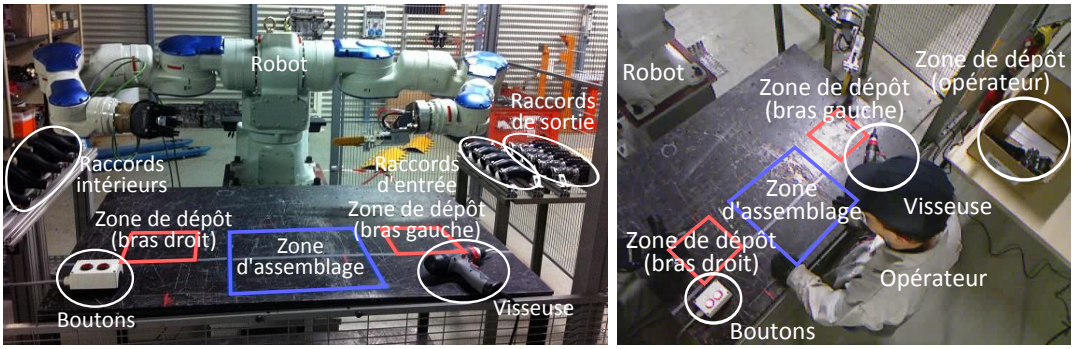


FIGURE 7.13 – La cellule expérimentale de collaboration homme-robot pour l'assemblage de raccords d'air (vue de face et vue de haut)

Afin d'étudier la distribution temporelle des tâches entre l'opérateur et le robot dans ce cas d'étude, nous avons choisi de faire varier deux paramètres : le degré d'interaction avec le robot et le contrôle, ou non, par l'opérateur, des étapes du robot.

7.3.1.2 Scénarios d'interaction

Trois scénarios différents ont été envisagés pour ce cas d'étude : ils correspondent à des niveaux croissants d'interaction avec le robot (S_1 faible, S_2 moyen et S_3 fort) et à des distributions temporelles différentes de collaboration entre l'opérateur et le robot.

Dans le premier scénario S_1, le robot dépose simplement les pièces dans les zones indiquées sur la table et l'opérateur les récupère une fois déposées (voir Figure 7.14). Il s'agit d'un scénario d'interaction faible entre l'opérateur et le robot : il n'y a aucun contact avec le robot et les tâches s'effectuent de manière asynchrone (dépôt de pièce par le robot, puis prise par l'opérateur).

Dans le deuxième scénario S_2, le robot tend les pièces à l'opérateur au-dessus des zones de dépôt : l'opérateur doit les récupérer directement au niveau des pinces du robot (voir Figure 7.15). Il s'agit d'un scénario d'interaction moyenne : il y a contact avec le robot via la pièce de montage et les opérations s'effectuent de manière synchrone (transmission de pièce du robot vers l'opérateur, au même moment).

Enfin, le troisième scénario S_3 fait intervenir une interaction plus forte avec le robot (voir Figure 7.16) : celui-ci maintient le raccord intérieur face à l'opérateur, qui doit assembler les raccords d'entrée et de sortie directement sur la pièce maintenue par la pince du robot. Le robot oriente également le raccord intérieur de manière à faciliter les opérations (emmanchage, vissage). Une fois la pièce terminée, le robot libère la pièce et l'opérateur la dépose de son côté. Dans ce troisième scénario, les opérations s'effectuent de manière synchrone et assistée : le robot et l'opérateur travaillent en même temps et le robot assiste directement l'opérateur.

Les diagrammes des Figures 7.14, 7.15 et 7.16 permettent de bien se représenter les différents niveaux de distribution temporelle des tâches entre l'opérateur et le robot. Chaque bras du robot fonctionne selon un cycle particulier (les flèches correspondent aux liens chronologiques) et le cycle des tâches de l'opérateur vient s'y intégrer différemment selon les scénarios. Les cycles des bras du robot sont représentés en orange, le cycle de l'opérateur est représenté en bleu et les tâches d'interaction entre l'opérateur et le robot sont représentées en vert.

Dans le premier scénario S_1 (voir Figure 7.14), le cycle de l'opérateur est presque indépendant de ceux des bras du robot : l'opérateur doit attendre le dépôt des pièces avant de les prendre, d'où une distribution temporelle synchronisée mais asynchrone (temps différés). Dans le deuxième scénario S_2 (voir Figure 7.15), les cycles du robot et de l'opérateur se rencontrent au niveau de la transmission des pièces : l'opérateur et le robot doivent s'échanger les pièces au même instant, d'où une distribution temporelle synchrone. Enfin, la distribution temporelle du troisième scénario S_3 (voir Figure 7.16) est également synchrone (transmission de pièces), mais l'interaction est plus forte puisque l'opérateur et le robot doivent travailler ensemble sur plus de tâches (opérations en vert).

7.3.1.3 Configurations de contrôle du robot

Pour chaque scénario précédemment décrit, nous avons envisagé deux configurations de contrôle du travail collaboratif : une première configuration C_1 où l'opérateur contrôle les étapes du robot manuellement (via des boutons) et une deuxième configuration C_2 où le robot travaille de manière automatique. Dans la configuration manuelle, l'opérateur est ainsi maître de la situation (le robot attend les ordres de l'opérateur), tandis que dans la configuration automatique, le robot fonctionne de manière plus « intelligente » et a tendance à imposer la cadence.

Pour la première configuration C_1, deux boutons sont disposés sur la table à gauche de l'opérateur (un pour chaque bras du robot) : ils permettent d'indiquer au robot d'ouvrir les pinces (pour déposer ou donner les pièces) et de changer l'orientation du raccord intérieur

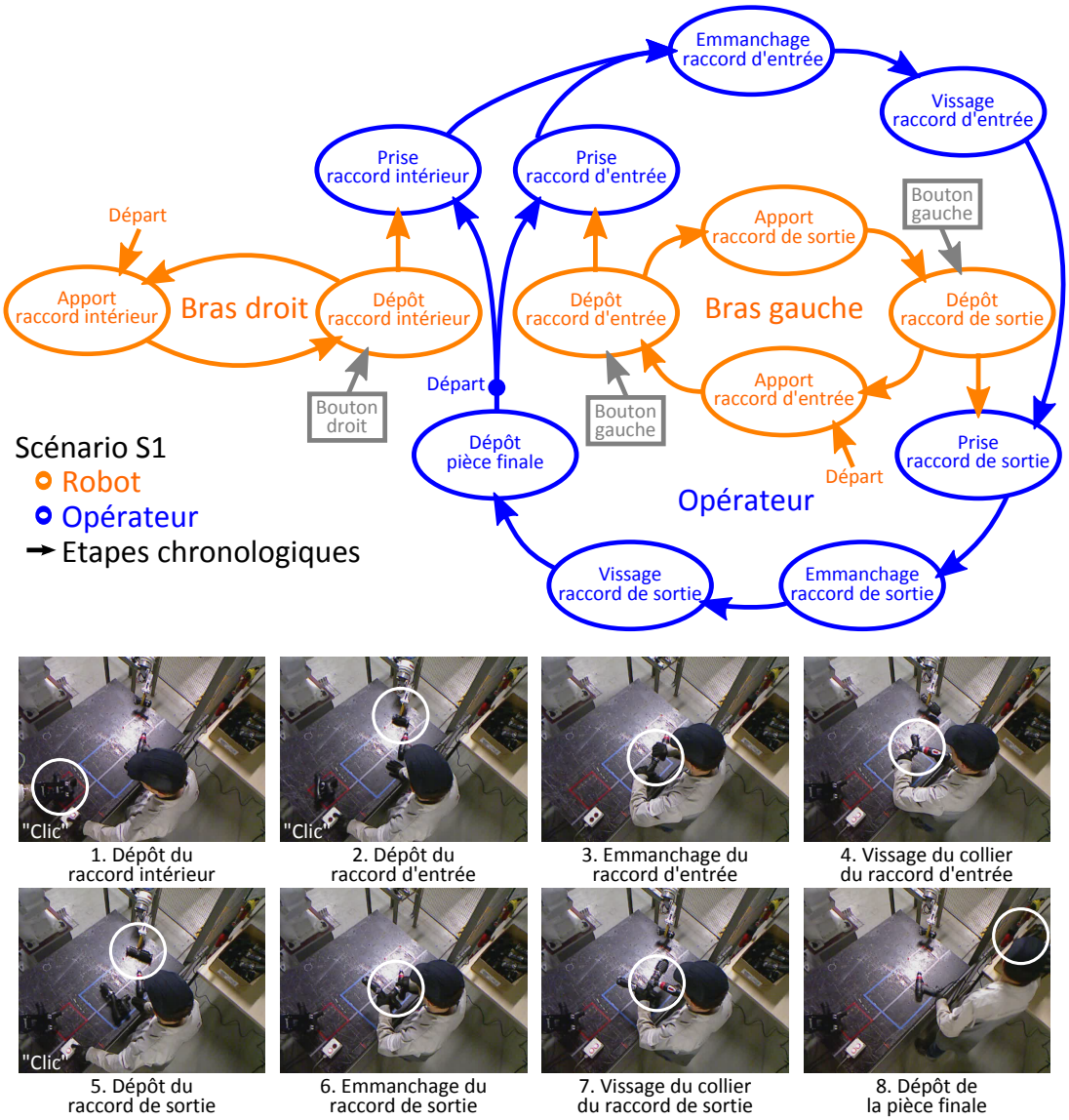


FIGURE 7.14 – Le scénario S_1 de collaboration homme-robot : le robot dépose les pièces sur la table

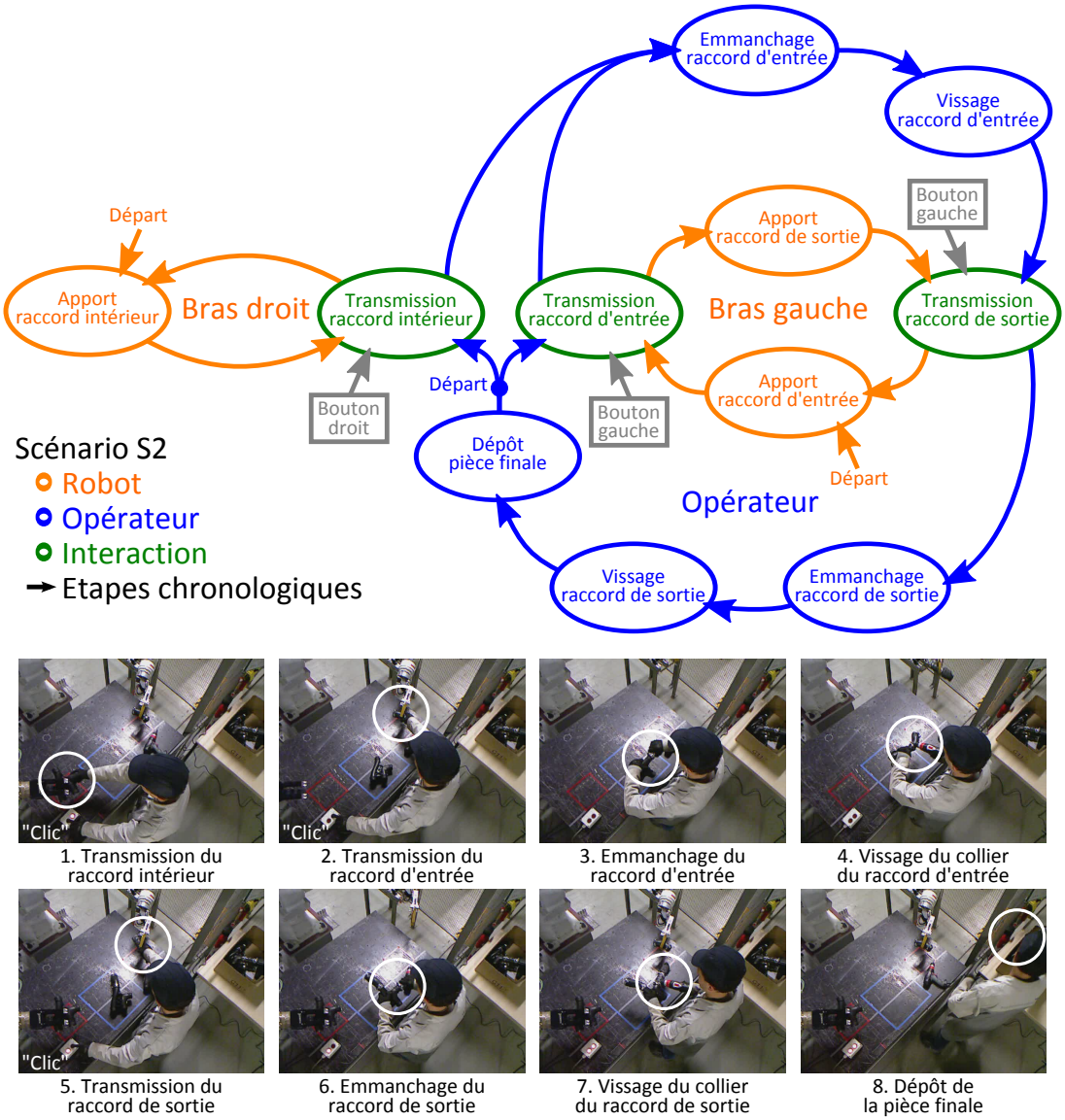


FIGURE 7.15 – Le scénario S_2 de collaboration homme-robot : le robot transmet directement les pièces à l'opérateur

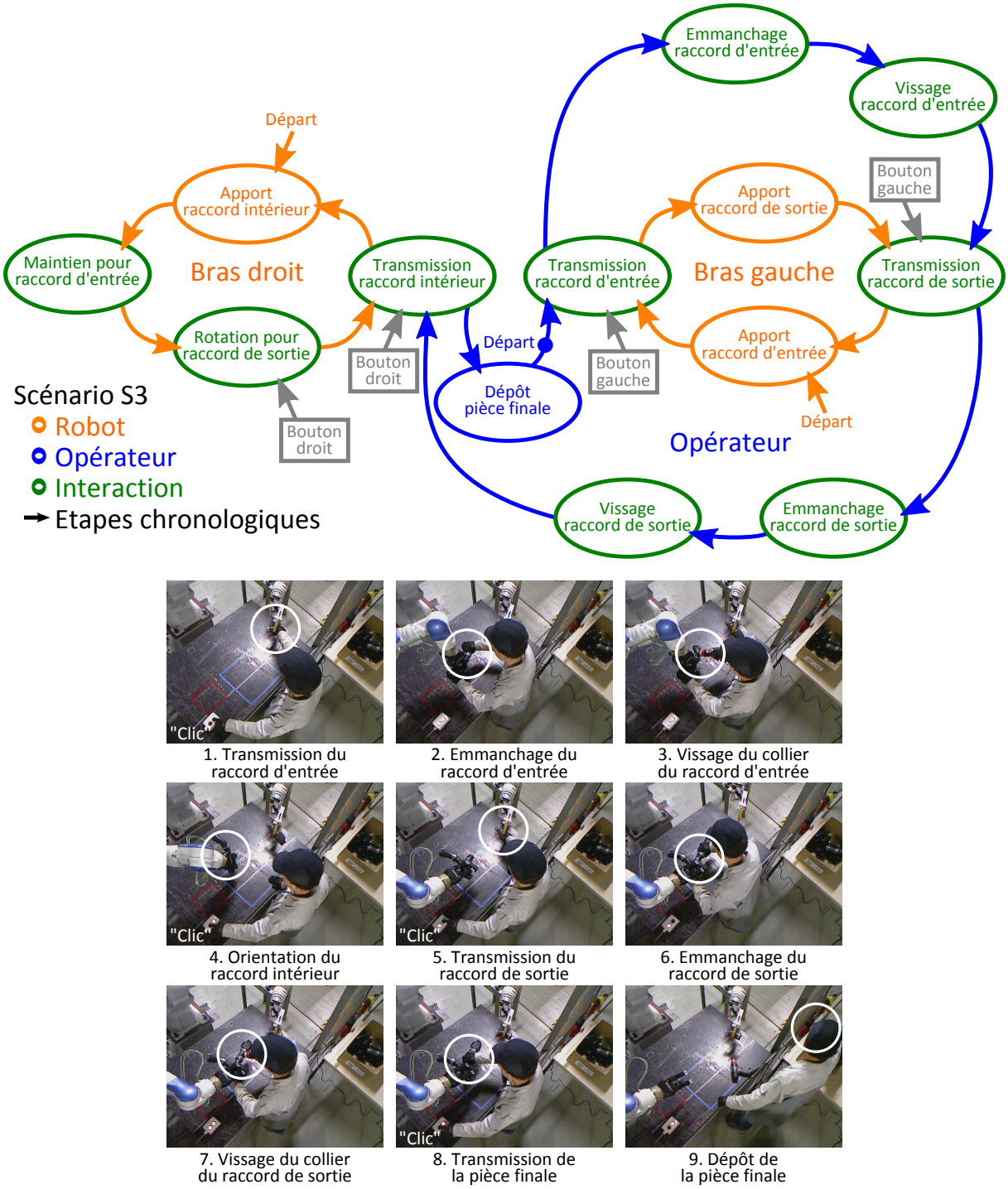


FIGURE 7.16 – Le scénario S_3 de collaboration homme-robot : le robot transmet les pièces à l'opérateur et maintient la pièce principale lors de l'assemblage

(seulement pour le scénario S_3, pour l'assemblage du raccord de sortie). Un voyant lumineux sur les boutons indique aux opérateurs quand une action est possible.

Pour la deuxième configuration C_2, les boutons ne sont plus présents sur la table et le robot est contrôlé à la manière d'un magicien d'Oz : les opérateurs sont informés que le robot fonctionne de manière automatique, mais c'est en réalité une personne extérieure (le coordinateur des tests) qui appuie sur les boutons aux moments opportuns (ce qui garantit également la sécurité du système). Dans la suite des recherches liées à la chaire, il est envisagé d'automatiser complètement le comportement du robot grâce à l'apport des résultats d'une thèse sur la reconnaissance des gestes des opérateurs.

Ainsi, un total de six conditions différentes est possible pour ce cas d'étude : 3 scénarios $\times$ 2 configurations de contrôle.

7.3.1.4 Implémentation

Le cas d'étude a été mis en place à la fois en situation réelle S_r et en situation virtuelle S_v (voir Figure 7.17).

FIGURE 7.17 – La cellule expérimentale de collaboration homme-robot en situation réelle et en situation virtuelle

La situation réelle a été mise en place au sein d'une cellule expérimentale chez PSA Peugeot Citroën. L'installation a été initiée grâce à un stage de robotique dans le cadre de la chaire, puis finalisée par un ingénieur de PSA Peugeot Citroën. La cellule a été montée physiquement à partir de zéro : mise en place du robot, de la table d'assemblage et des supports des pièces. Des pièces de montage ont été commandées spécialement à l'usine de Rennes de PSA Peugeot Citroën. La mise en place de la cellule a duré environ 5 mois (de mars à juillet 2014).

Le robot Motoman a été programmé grâce au logiciel du constructeur, selon trois programmes différents (un pour chaque scénario). Le bras droit du robot était muni d'une pince Robotiq 3 doigts. Cette pince possède différents modes de fonctionnement et son utilisation était adaptée à la prise du raccord intérieur (voir Figure 7.18). Le bras gauche était muni d'une pince Festo à deux doigts souples. Il s'agit d'une pince encore expérimentale dont la structure souple peut s'adapter à différents objets : son utilisation était donc adaptée à la prise à la fois des raccords d'entrée et de sortie (voir Figure 7.19).

La cellule expérimentale a été entièrement reproduite en environnement virtuel pour les besoins de cette expérimentation. Les modèles 3D des pièces de montage ont été récupérés auprès de PSA Peugeot Citroën, le modèle 3D du robot était disponible sur le site internet du constructeur et les tables de la cellule ont été reproduites à partir de la situation réelle. Les trois scénarios ont été implémentés en environnement virtuel de manière fidèle à la situation réelle.

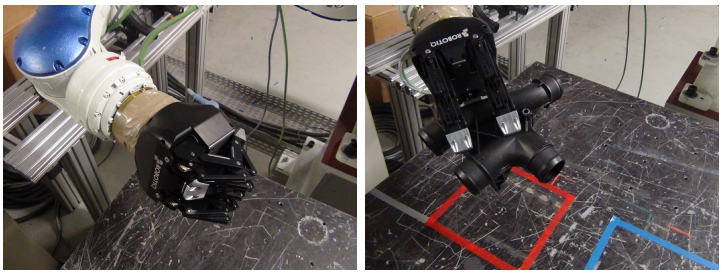


FIGURE 7.18 – La pince Robotiq à trois doigts et la prise du raccord intérieur

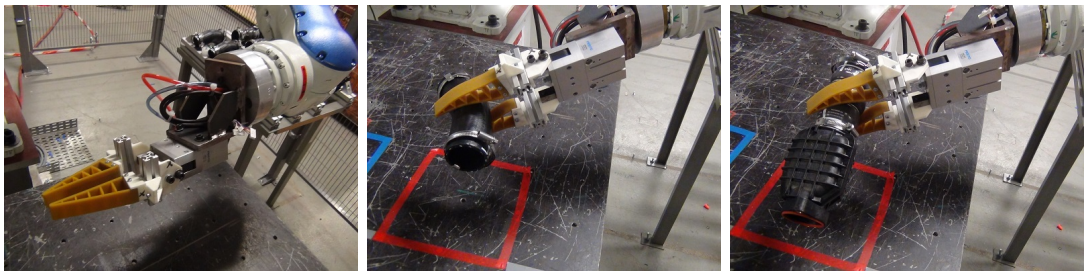


FIGURE 7.19 – La pince Festo à deux doigts souples et la prise des raccords d'entrée et de sortie

Le robot virtuel était contrôlé par cinématique inverse selon des trajectoires semblables à celles de la situation réelle.

La cellule expérimentale en situation virtuelle a été entièrement prototypée dans la salle immersive de l'école des Mines, mais elle était destinée à une utilisation dans le CAVE (5 faces) de PSA Peugeot Citroën (voir Figure 7.20). La position de l'opérateur étant globalement fixe devant la table, l'utilisation de ce système était pertinente : les utilisateurs étaient toujours face au robot et à la table et ne devaient se déplacer ou se tourner que pour déposer la pièce finale. Les utilisateurs étaient munis de lunettes stéréoscopiques (actives) pour voir la scène en relief. Leur point de vue était suivi à l'aide de caméras infrarouges et des capteurs sur les mains permettaient de détecter leur position dans l'environnement.

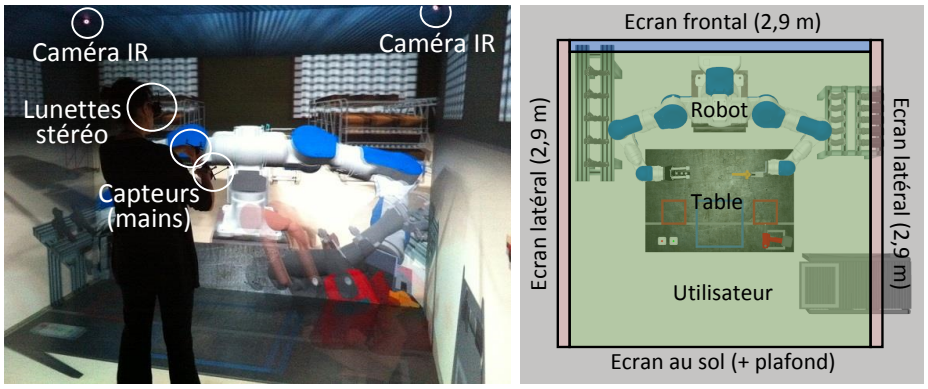


FIGURE 7.20 – Un utilisateur dans le CAVE de PSA Peugeot Citroën et la configuration du CAVE vue de haut

L'interaction avec les pièces virtuelles était relativement simple. Pour attraper une pièce, il suffisait d'approcher une des mains (détection de collision entre la pièce et la main virtuelle, que

nous appellerons « proximité » par la suite). En revanche, l'assemblage des pièces requiérait plus de dextérité : les raccords d'entrée et de sortie devaient être placés dans la bonne position et la bonne orientation pour pouvoir être assemblés sur le raccord intérieur et les colliers devaient être vissés en approchant la visseuse (virtuelle) dans la bonne orientation. Si besoin, les opérateurs pouvaient échanger les pièces entre chaque main ou les déposer face à eux sur la table. Pour les scénarios correspondants, des boutons étaient présents sur la table : ils pouvaient être enclenchés en approchant les mains (proximité de 5 cm). Les deux boutons étaient volontairement écartés afin de ne pas enclencher les deux à la fois par mégarde. Enfin, des retours sonores indiquaient aux opérateurs s'ils avaient bien vissé les colliers (bruit d'une visseuse) et appuyé sur un bouton (bruit d'un clic).

Malgré l'attention apportée à la mise en place des scénarios en environnement virtuel, des biais sensori-moteurs étaient présents par rapport à la situation réelle. Grâce à l'utilisation du CAVE à 5 faces de PSA Peugeot Citroën, les utilisateurs étaient bien immergés visuellement dans l'environnement virtuel, ce qui aurait été impossible avec l'écran rétroprojeté de l'école des Mines : manque de visibilité des pièces sur la table (partie basse du champ de vision) et du bac de sortie (partie droite). Cependant, le champ de vision des utilisateurs était réduit par l'utilisation des lunettes stéréoscopiques (le bord des lunettes bloque la vision périphérique des utilisateurs) et l'écran au sol pouvait manquer de luminosité.

Au niveau des interactions avec les pièces virtuelles, aucun système à retour d'effort n'a été utilisé. Il aurait pu être envisagé d'utiliser de véritables pièces de montage suivies dans l'environnement virtuel, mais la complexité des scénarios ne permettait pas une telle démarche. Les utilisateurs n'avaient donc aucun autre indice que visuel (et sonore pour la visseuse et les boutons) pour s'assurer qu'une pièce avait bien été attrapée ou assemblée. Ce manque de retour haptique pouvait notamment poser problème lorsqu'il s'agissait de récupérer une pièce tendue par le robot (avec une main) tout en appuyant sur un bouton (avec l'autre main). Ces limitations ont été réduites avec la possibilité de modifier la difficulté d'assemblage des pièces. Par défaut, la tolérance d'assemblage était de $\pm$ 5 cm en position et $\pm$ 10° en orientation. Cette tolérance pouvait être modifiée en fonction des aptitudes des opérateurs et de manière à respecter la même cadence entre la situation virtuelle et la situation réelle.

7.3.2 Tests utilisateurs

Des tests utilisateurs ont été menés avec des opérateurs de PSA Peugeot Citroën. L'objectif des tests était de comparer chaque scénario de collaboration avec le robot (S_1, S_2, S_3), dans une configuration de contrôle manuelle (C_1) ou automatique (C_2), à la fois en situation réelle (S_r) et en situation virtuelle (S_v). La finalité des tests était de recueillir les ressentis des opérateurs en termes d'acceptabilité.

7.3.2.1 Population

Dans un premier temps, un appel à volontaires a été lancé sur le site de Vélizy de PSA Peugeot Citroën : 3 personnes ont participé aux tests suite à cet appel. Puis le principe des expérimentations a été présenté à l'usine PSA Peugeot Citroën de Trémery : 6 moniteurs se sont portés volontaires pour se déplacer à Vélizy et procéder aux tests. Certains d'entre eux étaient habitués à gérer des pannes de robots sur les lignes automatisées. Un total de 9 personnes a ainsi participé aux expérimentations.

7.3.2.2 Protocole

Le protocole des tests est représenté dans le Tableau 7.4. Les tests se déroulaient sur une journée entière par utilisateur : une demi-journée était dédiée à la situation réelle, et l'autre demi-journée était dédiée à la situation virtuelle. L'ordre des demi-journées était aléatoire pour chaque utilisateur. Pour chaque demi-journée, les utilisateurs testaient chaque condition d'interaction avec le robot (6 en tout : 3 scénarios $\times$ 2 configurations de contrôle du robot) et répétaient les assemblages 3 fois par condition (3 cycles de 5 pièces).

Situation	Virtuelle Sv (matin)								Réelle Sr (après-midi)							
Etape	Entraîn.	Test 1		Test 2		Test 3		Quest. Qs	Entraîn.	Test 1		Test 2		Test 3		Quest. Qs
Scénario	Sans robot	Scénario S1		Scénario S2		Scénario S3			Sans robot	Scénario S1		Scénario S2		Scénario S3		
Configuration		C2	C1	C1	C2	C2	C1			C1	C2	C1	C2	C2	C1	

	Scénario (S1, S2 ou S3)							
Condition	Repos	C2 (automatique)			C1 (manuel)			Quest. Qc
Etape		Cycle 1 (5 tâches)	Cycle 2 (5 tâches)	Cycle 3 (5 tâches)	Cycle 1 (5 tâches)	Cycle 2 (5 tâches)	Cycle 3 (5 tâches)	
Mesures physio.	Φ0	Φ1	Φ2	Φ3	Φ1	Φ2	Φ3	

TABLE 7.4 – Un exemple de déroulement des tests pour un opérateur

Au début de chaque journée, les problématiques de la chaire et les enjeux des tests étaient présentés aux opérateurs : enjeux de la collaboration homme-robot pour l'ergonomie et la santé des opérateurs, nécessité d'étudier l'acceptabilité de ces nouveaux postes. Le poste de montage de raccords d'air en collaboration avec un robot leur était ensuite décrit, ainsi que les opérations à effectuer. Il leur était bien indiqué que les tests ne se focalisaient pas sur la performance et l'efficacité des opérations, mais sur l'acceptabilité du poste et la relation avec le robot. Ainsi, il était demandé aux opérateurs de faire du mieux qu'ils le pouvaient au cours des tests (maintien du temps de cycle, qualité des opérations), mais que des opérations oubliées ou trop longues n'avaient pas d'impacts majeurs sur les tests. Cette mise en situation avait également pour but de décontracter les opérateurs.

Au début de chaque demi-journée, la situation d'expérimentation était présentée aux utilisateurs (cellule expérimentale physique ou environnement virtuel du CAVE). Les opérateurs étaient ensuite invités à s'entraîner sur la tâche d'assemblage, sans le robot, autant de temps qu'ils le désiraient. Puis les tests commençaient. Pour chaque scénario, les utilisateurs testaient chaque configuration de contrôle du robot l'une à la suite de l'autre, de manière aléatoire (le regroupement des configurations de contrôle du robot a été effectué pour pouvoir les comparer facilement et ne pas perturber les utilisateurs par le changement trop fréquent des scénarios). Une fois les tests liés à ce scénario terminés, le scénario suivant était proposé aux utilisateurs. L'ordre des scénarios était le même pour tous les utilisateurs, par degré croissant d'interaction : scénario S_1, scénario S_2 puis scénario S_3.

7.3.2.3 Mesures

Au cours des tests, un ensemble de mesures étaient récoltées auprès des utilisateurs pour évaluer l'acceptabilité de chacune des conditions. Les instants dédiés à ces mesures sont représentés dans le Tableau 7.4.

Plusieurs questionnaires étaient posés au cours des tests. Ces questionnaires ont été repris de l'étude sur la distribution spatiale (voir Chapitre 6) et adaptés : certaines questions trop redondantes ont été retirées, tandis que d'autres questions sur l'utilité et l'efficacité ont été rajoutées. Un premier questionnaire Q_c était posé à l'issue de chaque scénario et permettait de comparer les deux configurations de contrôle du robot (manuelle C_1 ou automatique C_2). Un deuxième questionnaire Q_s était posé à l'issue de chaque demi-journée pour évaluer les impressions des utilisateurs vis-à-vis de la situation réelle et de la situation virtuelle.

Des mesures physiologiques étaient utilisées pour évaluer l'état affectif des utilisateurs. Les indicateurs retenus étaient la moyenne du rythme cardiaque et la myenne de la conductance de la peau. Les mesures étaient récoltées au repos avant chaque scénario (mesure de repos pour la normalisation des résultats) et à l'issue de chaque cycle de 5 assemblages, pour un total de 21 acquisitions par demi-journée (voir Tableau 7.4). Le rythme cardiaque et la conductance de la peau étaient mesurés pendant une minute, puis moyennés et normalisés pour chaque utilisateur.

7.3.3 Résultats du questionnaire sur les scénarios de collaboration

Le questionnaire Q_c (voir Tableau 7.5) était posé à l'issue de chaque scénario de collaboration (S_1, S_2, S_3) pour évaluer les impressions des opérateurs sur la configuration de travail et la collaboration avec le robot. Le questionnaire comprenait 12 questions qui étaient liées à six thèmes principaux : le niveau d'interaction (1 question), l'utilisabilité (3 questions), la sécurité (2 questions), l'utilité (2 questions), l'efficacité (2 questions) et l'acceptabilité (2 questions).

Les réponses aux questions s'effectuaient sur une échelle de 1 à 6, entre deux extrêmes indiqués sur les questionnaires. Une échelle à 6 points a été choisie pour éviter les réponses neutres. Les thèmes des questions n'étaient pas indiqués aux opérateurs.

Thèmes	Questions	Réponses								Manuel	Automatique
Interaction	Le niveau d'interaction avec le robot vous a semblé	Faible	1	2	3	4	5	6	Fort		
Utilisabilité	Vous avez eu l'impression de contrôler le travail avec le robot	Non	1	2	3	4	5	6	Oui		
	Le travail avec le robot vous a imposé des contraintes supplémentaires*	Non	1	2	3	4	5	6	Oui		
	La cadence du robot vous a rendu	Anxieux	1	2	3	4	5	6	Décontracté		
Sécurité	Au cours de l'interaction, vous vous êtes senti	En insécurité	1	2	3	4	5	6	En sécurité		
	L'interaction directe avec le robot vous a rendu	Anxieux	1	2	3	4	5	6	Décontracté		
Utilité	Au cours de l'interaction, le robot vous a semblé	Inutile	1	2	3	4	5	6	Utile		
	Au cours de l'interaction, vous vous êtes senti	Inutile	1	2	3	4	5	6	Utile		
Efficacité	Au cours de l'interaction, vous vous êtes senti	Inefficace	1	2	3	4	5	6	Efficace		
	Au cours de l'interaction, le robot vous a semblé	Inefficace	1	2	3	4	5	6	Efficace		
Acceptabilité	L'interaction avec le robot vous a semblé	Perturbante	1	2	3	4	5	6	Satisfaisante		
	La collaboration avec le robot vous a semblé acceptable	Non	1	2	3	4	5	6	Oui		

*échelle inversée

TABLE 7.5 – Le questionnaire Q_c posé pour chaque scénario de collaboration

Pour l'ensemble des résultats, il convient de comparer les configurations de contrôle (manuelle C_1 et automatique C_2), les scénarios de collaboration (S_1, S_2 et S_3) et les situations d'expérimentation (réelle S_r et virtuelle S_v). Dans un premier temps, les résultats globaux sont présentés (questions regroupées par thèmes principaux), puis chaque thème est analysé en détail. Des tests de Friedman et de Wilcoxon (comparaisons 2 à 2) ont été menés pour déceler les différences significatives. Les résultats des tests statistiques sont disponibles en Annexe E.

7.3.3.1 Résultats globaux

Les résultats globaux du questionnaire Q_c (moyennes des résultats regroupés par thèmes) sont représentés sur la Figure 7.21.

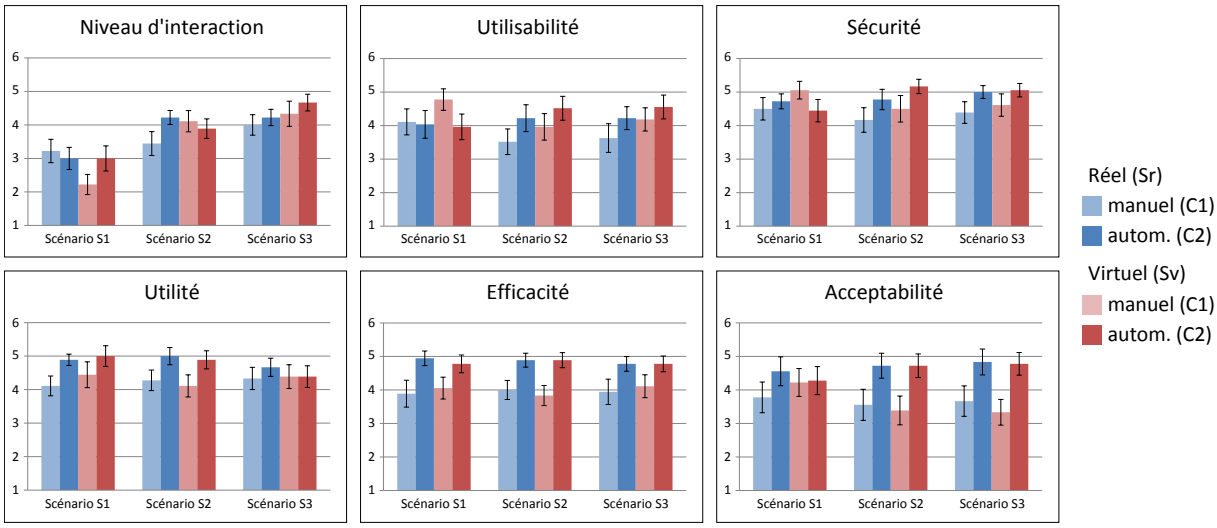


FIGURE 7.21 – Les résultats du questionnaire Q_c sur les scénarios de collaboration, regroupés par thèmes

Des différences significatives ont été trouvées pour le niveau d'interaction, l'utilité perçue, l'efficacité perçue et l'acceptabilité de la collaboration. Des différences plus faibles ont été décelées concernant l'utilisabilité et la sécurité perçue. L'absence de différences significatives pour l'utilisabilité s'explique par un équilibre dans les réponses aux questions : les questions sur le contrôle du travail et les contraintes imposées se sont contrebalancées (voir la Section 7.3.3.3 pour plus de précisions).

D'un point de vue général, les configurations qui ont été les mieux acceptées des opérateurs étaient les configurations automatiques (C_2), à la fois en environnement réel et en environnement virtuel. On peut en effet noter que les configurations manuelles (C_1) étaient jugées moins utilisables, moins utiles et moins efficaces de la part des opérateurs, pour chaque scénario. De plus, les opérateurs avaient tendance à se sentir plus en sécurité lorsque le robot travaillait de manière automatique (C_2).

Au niveau des scénarios de collaboration avec le robot (S_1, S_2, S_3), peu de différences semblent apparaître dans les réponses au questionnaire. Le niveau d'interaction a tout de même été jugé croissant au fur et à mesure des scénarios, ce qui était bien l'objectif recherché. Le fait de répondre au questionnaire Q_c à l'issue de chaque scénario a probablement focalisé les opérateurs sur la comparaison entre les configurations de contrôle (C_1 et C_2), ce qui a atténué les différences observables pour les réponses entre scénarios.

Au niveau de la comparaison entre environnement réel et environnement virtuel, les mêmes tendances semblent apparaître dans les résultats. Peu de différences absolues interviennent entre les situations d'expérimentation, notamment pour l'acceptabilité.

Dans la suite, nous détaillons chaque thème du questionnaire.

7.3.3.2 Niveau d'interaction

Une question sur le niveau d'interaction était posée aux opérateurs pour chaque scénario et pour chaque configuration de contrôle du robot. Le but de cette question était de constater comment les opérateurs percevaient la tâche de collaboration avec le robot. Le niveau d'interaction perçu par les opérateurs est représenté sur la Figure 7.22 pour chaque scénario.

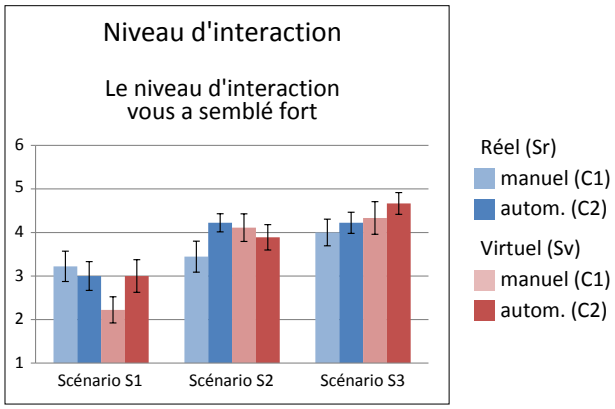


FIGURE 7.22 – Les résultats du questionnaire Q_c pour la question sur le niveau d'interaction

Le niveau d'interaction a été le plus bas pour le scénario S_1 (le robot pose les pièces) et plus élevé pour les scénarios S_2 et S_3. Ceci conforte le fait que le contact physique avec le robot, via la pièce maintenue ou directement avec le préhenseur, donnait une plus forte impression d'interaction avec le robot.

On peut également noter que l'interaction semblait plus forte lorsque le robot fonctionnait de manière automatique (C_2), surtout pour le scénario S_2. Pour certains opérateurs, le fait que le robot fonctionne de manière automatique était souvent synonyme d'une intelligence plus poussée et donc d'une interaction plus forte pendant la tâche. A l'inverse, d'autres opérateurs ont considéré que l'appui sur des boutons représentait une interaction supplémentaire avec le robot. La présence de ces deux tendances peut expliquer la faible différence dans les résultats entre les configurations de contrôle (C_1 et C_2).

En environnement virtuel, le niveau d'interaction avec le robot semble avoir été noté de façon similaire à l'environnement réel.

7.3.3.3 Utilisabilité

Les questions liées à l'utilisabilité traitent des notions de contrôle du travail avec le robot, des contraintes imposées et de la cadence du robot. Les résultats de ces questions sont représentés sur la Figure 7.23.

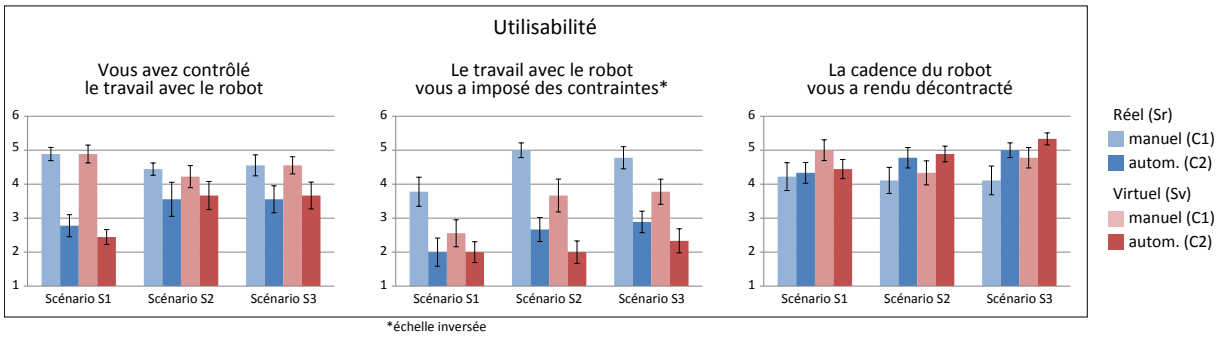


FIGURE 7.23 – Les résultats du questionnaire Q_c pour les questions sur l'utilisabilité

Des différences significatives ont été décelées à la fois pour le contrôle du travail et pour les contraintes imposées. En configuration manuelle (C_1), les opérateurs contrôlaient mieux la

situation : le robot ne donnaient les pièces que quand on le lui indiquait. Mais c'est également dans cette configuration manuelle (C_1) qu'il y avait le plus de contraintes imposées : le fait d'appuyer sur des boutons rajoutait des tâches supplémentaires et rendait la collaboration moins fluide. Les réponses à ces deux questions se sont équilibrées, ce qui explique notamment l'absence de différences significatives dans le thème global sur l'utilisabilité. Néanmoins, en recueillant les impressions des opérateurs au cours des tests, il est apparu clairement que les opérateurs étaient plus sensibles aux contraintes imposées qu'à la notion de contrôle du travail : ils préféraient travailler avec moins de contraintes, quitte à moins bien contrôler les étapes du robot.

Les opérateurs se sont également sentis plus décontractés lorsqu'ils ne devaient pas gérer la cadence du robot (troisième question sur l'utilisabilité). Le fait d'appuyer sur des boutons rajoutait des tâches à effectuer et augmentait la charge cognitive : au cours des tests, certains opérateurs restaient figés à certains moments car ils ne savaient plus dans quel ordre appuyer sur les boutons.

Au niveau des scénarios, plusieurs remarques sont à formuler. Le scénario S_1 semble avoir été le plus utilisable : plus de contrôle du travail, moins de contraintes. Pour les scénarios S_2 et S_3, le fait que le robot donne directement les pièces à l'opérateur posait parfois problème : les pièces étaient présentées par le robot d'une certaine manière et les opérateurs devaient s'y adapter pour les récupérer et les repositionner dans la main si besoin. Pour le scénario S_1, les pièces étaient déposées sur la table et les opérateurs étaient libres de les récupérer comme ils le souhaitaient. On peut également remarquer que les contraintes imposées par le travail avec le robot ont augmenté légèrement avec le niveau d'interaction avec le robot.

Enfin, on ne décèle pas de grande différence dans les réponses au questionnaire entre l'environnement réel et l'environnement virtuel et les mêmes tendances semblent apparaître. Les opérateurs semblaient cependant plus relaxés en environnement virtuel qu'en environnement réel (question sur la cadence). De plus, les contraintes imposées par le robot semblent avoir été plus fortes en environnement réel qu'en environnement virtuel. En effet, les opérations virtuelles étaient légèrement simplifiées (préhension et assemblage des pièces) et certaines subtilités ou difficultés n'apparaissaient que lors des tests en environnement réel.

7.3.3.4 Sécurité

Les résultats des questions liées à la sécurité sont représentés sur la Figure 7.24. Ces questions concernent l'impression générale de sécurité et le niveau de décontraction lié à l'interaction avec le robot.

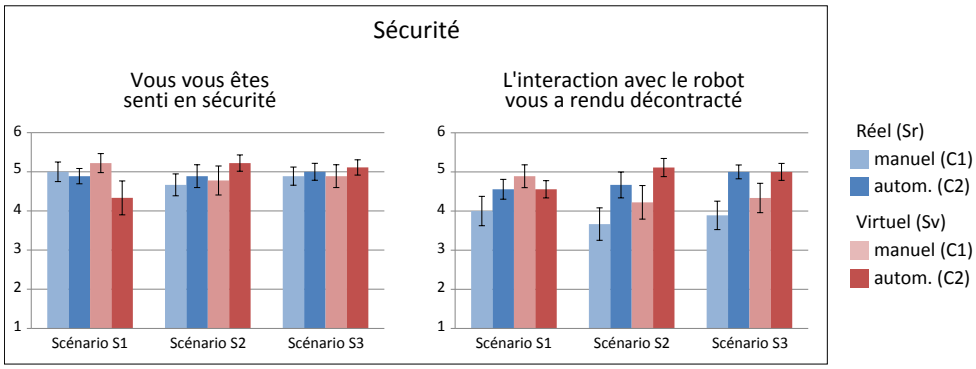


FIGURE 7.24 – Les résultats du questionnaire Q_c pour les questions sur la sécurité

Peu de différences significatives sont apparues concernant l'impression générale de sécurité entre configurations de contrôle du robot (C_1 et C_2). Deux tendances sont apparues chez les opérateurs (ce qui a probablement atténué les différences dans les résultats). La tendance attendue était celle de se sentir plus en sécurité en configuration manuelle (C_1) : le fait de contrôler manuellement le travail avec le robot devait permettre de se sentir moins menacé et de réduire les erreurs dues au robot, et c'est ce qu'a ressenti une partie des opérateurs. En revanche, l'autre partie des opérateurs a considéré que le fonctionnement automatique du robot (C_2) signifiait que celui-ci était plus intelligent et donc que la situation était moins dangereuse. Au-delà de ces deux tendances, les opérateurs se sont toujours sentis plus décontractés en configuration automatique (C_2) car ils n'avaient pas à gérer les boutons.

Peu de différences sont apparues entre les scénarios de collaboration (S_1, S_2, S_3) : les opérateurs se sont sentis en sécurité au cours de la totalité des tests. Il ne semble pas y avoir de corrélation entre le niveau d'interaction avec le robot et l'impression de sécurité : on aurait pu penser qu'un niveau fort d'interaction engendrerait une impression de sécurité plus faible. Ceci constitue un point intéressant : les opérateurs sont a priori disposés à travailler en interaction avec le robot de manière prononcée, sans se sentir en danger.

Les résultats des questionnaires sont similaires en environnement réel et en environnement virtuel : les opérateurs se sont sentis autant en sécurité dans les deux situations. Le niveau de décontraction semble cependant légèrement plus élevé en environnement virtuel.

7.3.3.5 Utilité

Les résultats des questions liées à l'utilité du robot et de l'opérateur sont représentés sur la Figure 7.25.

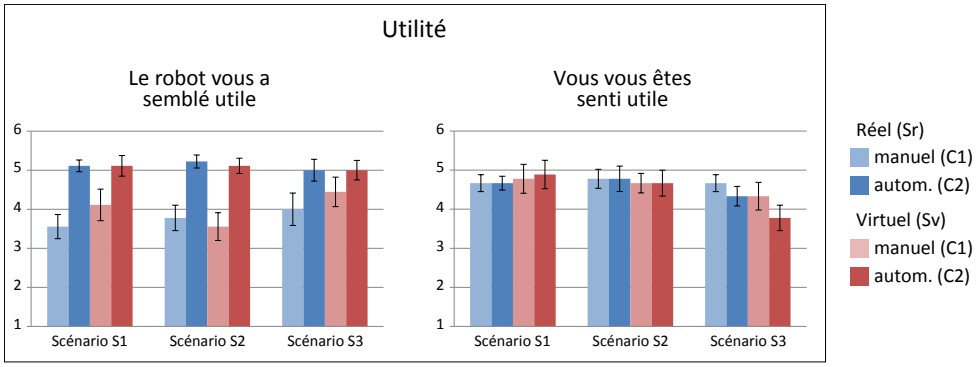


FIGURE 7.25 – Les résultats du questionnaire Q_c pour les questions sur l'utilité

Le robot a toujours été jugé plus utile lorsqu'il fonctionnait de manière automatique (C_2) : ceci est cohérent puisque le robot semblait plus intelligent et apportait une valeur ajoutée au travail collaboratif.

Concernant les scénarios, certains opérateurs ont apprécié l'assistance du robot dans le scénario S_3 (maintien du raccord intérieur), notamment en matière d'ergonomie : réduction des mouvements des poignets, maintien de pièces lourdes ou volumineuses. Mais ces impressions n'ont pas été retranscrites dans les réponses aux questionnaires : aucune différence significative n'est apparue entre les scénarios. Cette absence de différence peut être expliquée par plusieurs facteurs. D'une part, vis-à-vis de la structure du questionnaire, les opérateurs se sont probablement contentés de comparer les configurations de contrôle (C_1 et C_2) sans accorder trop

d'importance aux scénarios. D'autre part, l'apport du scénario S_3 par rapport aux autres restait tout de même minime : la pièce maintenue était légère et l'assemblage principal était toujours effectué par l'opérateur. De plus, les opérateurs trouvaient parfois plus utile d'assembler les pièces manuellement en répartissant les efforts sur deux bras plutôt que de n'utiliser qu'un seul bras avec l'assistance du robot (l'un des bras travaillait plus que l'autre).

Aucune différence significative n'est apparue concernant l'utilité des opérateurs. De leur point de vue, les opérateurs effectuaient toujours les mêmes tâches, ce qui n'influençait pas leur utilité. De plus, certains opérateurs ont trouvé cette question perturbante : ils étaient forcément utiles, sinon on ne leur demanderait pas de travailler sur ce poste.

La même tendance dans les résultats semble se retrouver à la fois en environnement réel et en environnement virtuel. Le fait d'interagir en environnement virtuel n'a donc pas influencé l'utilité perçue du robot par les opérateurs.

7.3.3.6 Efficacité

Les résultats des questions liées à l'efficacité perçue de l'opérateur et du robot sont représentés sur la Figure 7.26.

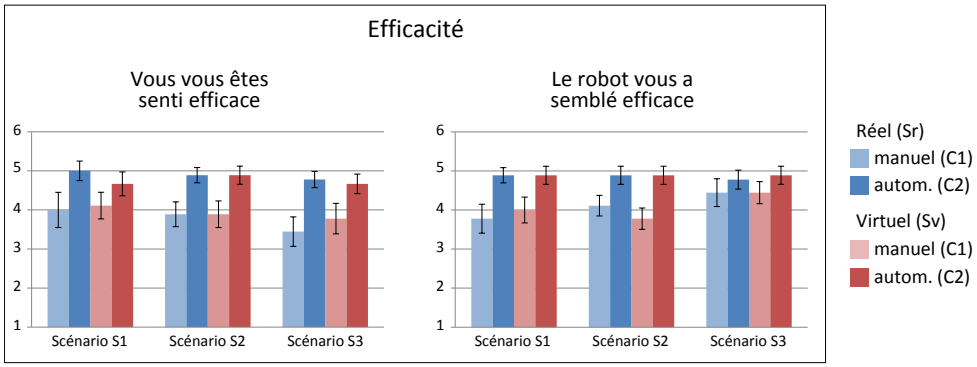


FIGURE 7.26 – Les résultats du questionnaire Q_c pour les questions sur l'efficacité

De manière générale, les opérateurs se sont toujours sentis plus efficaces lorsque le robot fonctionnait de manière automatique (C_2). C'est aussi dans cette configuration que le robot était trouvé plus efficace. En effet, en configuration manuelle (C_1), les opérateurs avaient des tâches en plus à traiter (appuyer sur des boutons), ce qui a augmenté leur charge cognitive : au cours des tests, certains opérateurs perdaient le fil des opérations à effectuer et hésitaient quelques instants avant de se rappeler sur quel bouton appuyer ou dans quel ordre effectuer les opérations. Il semble donc cohérent que les opérateurs se sentaient plus efficaces lorsqu'ils n'avaient pas à gérer les étapes du robot et pouvaient se concentrer sur la tâche d'assemblage. De plus, le fonctionnement automatique du robot imposait une cadence à suivre aux opérateurs, ce qui les a poussés à être plus efficaces.

Les opérateurs semblent s'être sentis légèrement moins efficaces pour le scénario S_3 que pour les autres scénarios. Ceci est dû au fait qu'à certains instants de la tâche, les opérateurs devaient attendre que le robot apporte une nouvelle pièce (un nouveau raccord intérieur) : à cause du maintien du raccord intérieur, le temps de cycle était en effet légèrement plus long pour le scénario S_3 que pour les autres scénarios. De plus, au cours du scénario S_3, le bras gauche des opérateurs était presque toujours au repos : ceci a réduit leur impression d'efficacité.

Peu de différences sont apparues entre les situations d'expérimentation (réel et virtuel) et les mêmes tendances ont été relevées (meilleure efficacité en fonctionnement automatique C_2).

7.3.3.7 Acceptabilité

Les résultats sur l'acceptabilité regroupent les questions concernant l'impression de satisfaction liée à l'interaction et l'acceptabilité de la collaboration. Ces résultats sont représentés sur la Figure 7.27.

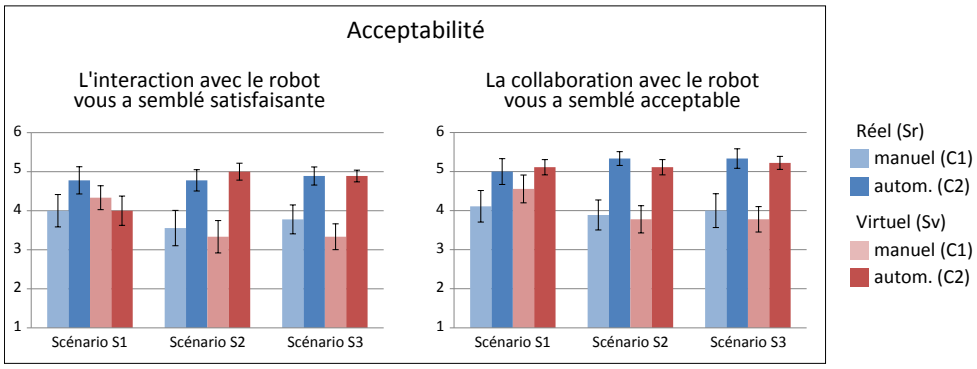


FIGURE 7.27 – Les résultats du questionnaire Q_c pour les questions sur l'acceptabilité

De manière générale, l'interaction avec le robot a toujours semblé plus satisfaisante et la collaboration plus acceptable lorsque le robot fonctionnait de manière automatique (C_2). Au regard des considérations précédentes sur les autres thèmes du questionnaire, cette tendance semble cohérente : la collaboration imposait moins de contraintes, le robot était plus utile et les opérateurs se sentaient plus efficaces.

Peu de différences significatives semblent apparaître entre les scénarios. La satisfaction de l'interaction a été équivalente dans chaque scénario, ainsi que le niveau d'acceptabilité de collaboration. Cette absence de différence correspond bien également à celle retrouvée dans les autres thèmes du questionnaire. Nous nous attendions à ce que l'assistance proposée par le robot à l'opérateur améliore l'acceptabilité de la collaboration, mais la trop forte interaction avec le robot (amenant plus de contraintes) a peut-être réduit ce phénomène. Cependant, certains opérateurs ont indiqué que le fait d'échanger les pièces directement avec le robot était plus satisfaisant et plus valorisant que de simplement les poser sur la table : ils avaient ainsi l'impression de véritablement travailler avec une personne.

Enfin, les réponses au questionnaire semblent similaires entre environnement réel et environnement virtuel. Les réponses absolues semblent équivalentes et les mêmes tendances dans les résultats ont été retrouvées dans les deux situations d'expérimentation.

7.3.4 Résultats du questionnaire sur les situations d'expérimentation

Le questionnaire Q_s (voir Tableau 7.6) était posé à l'issue de chaque demi-journée pour comparer les impressions des opérateurs vis-à-vis de chaque situation d'expérimentation : réelle (S_r) et virtuelle (S_v). Le questionnaire contenait 7 questions regroupées en trois thèmes principaux : la familiarisation (2 questions), la sécurité (4 questions) et l'acceptabilité (1 question).

Les réponses aux questions s'effectuaient sur une échelle de 1 à 6, 1 signifiant un désaccord avec l'intitulé et 6 un accord complet. Les thèmes des questions n'étaient pas indiqués aux opérateurs.

Thèmes	Questions	Réponses							
Familiarisation	Vous avez eu sufisamment de temps pour vous familariser avec les opérations	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
	Vous étiez à l'aise avec les opérations à effectuer	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
Sécurité	L'apparence du robot vous a paru sécurisante	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
	L'interaction avec le robot était à une distance adaptée	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
	La vitesse du robot était adaptée	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
	Vous vous êtes senti en sécurité	Non	1	2	3	4	5	6	Oui
Acceptabilité	La collaboration avec le robot était acceptable	Non	1	2	3	4	5	6	Oui

TABLE 7.6 – Le questionnaire Q_s sur les situations d'expérimentation

Dans la suite, nous présentons d'abord les résultats globaux en considérant les thèmes principaux, puis nous détaillons les réponses aux questions de chaque thème indépendamment. Des tests de Wilcoxon ont été menés pour déceler les différences significatives entre situations (disponibles en Annexe E).

7.3.4.1 Résultats globaux

Les résultats globaux du questionnaire Q_s sont représentés en Figure 7.28, regroupés par thèmes (moyennes des questions correspondantes).

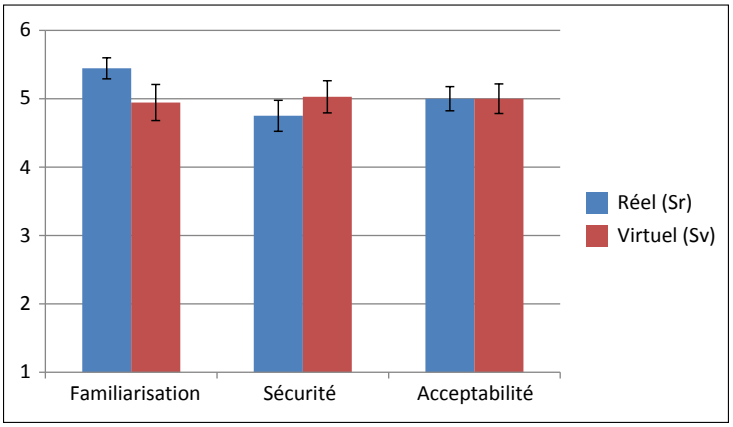


FIGURE 7.28 – Les résultats du questionnaire Q_s sur les situations d'expérimentation regroupés par thèmes

Aucune différence significative n'a été décelée dans les réponses au questionnaire. De manière générale, on peut cependant noter que les opérateurs se sont sentis légèrement moins familiarisés à l'environnement virtuel qu'à l'environnement réel. L'impression de sécurité était également légèrement plus élevée en environnement virtuel. Enfin, l'acceptabilité relative à la collaboration avec le robot était similaire en situation réelle et en situation virtuelle.

Dans la suite, nous analysons chacun de ces thèmes en détail pour donner plus de signification à leur interprétation.

7.3.4.2 Familiarisation

Les résultats des questions sur la familiarisation sont disponibles sur la Figure 7.29.

Les opérateurs se sont sentis légèrement moins familiarisés à l'environnement virtuel qu'à l'environnement réel (de manière non significative). Ceci semble cohérent puisque les opérateurs

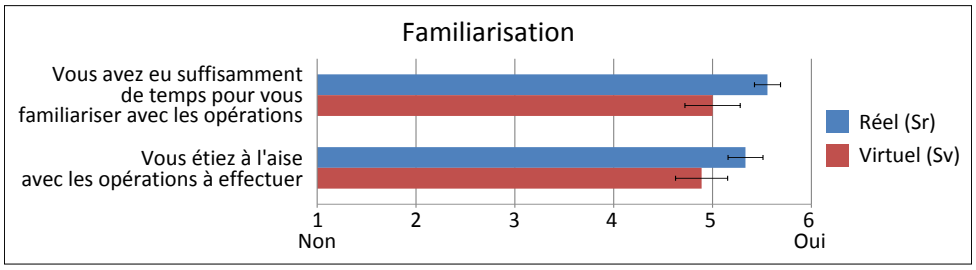


FIGURE 7.29 – Les résultats du questionnaire Q_s pour les questions sur la familiarisation

venaient d'un milieu industriel et connaissaient les tâches à effectuer en usine. En revanche, les opérateurs n'avaient jamais utilisé de systèmes de réalité virtuelle auparavant, d'où une familiarisation moins forte avec les opérations virtuelles. Afin de mettre les opérateurs à l'aise dans l'environnement virtuel, ils pouvaient s'entraîner autant de temps qu'ils le souhaitaient sur la tâche virtuelle d'assemblage, sans robot. C'est aussi pendant cette phase d'entraînement que les tolérances d'assemblage étaient réglées en fonction des aptitudes des opérateurs.

Par comparaison au cas d'étude de montage de porte en coprésence avec un robot (Chapitre 6), les opérations à effectuer étaient plus complexes, notamment en environnement virtuel. Dans le premier cas d'étude, les pièces virtuelles étaient assemblées par simple proximité avec leur emplacement sur la porte. Dans le cas d'étude avec le robot bi-bras, les raccords d'air devaient être positionnés et orientés de la bonne manière pour qu'ils soient emmanchés sur le raccord intérieur et la visseuse devait être dans l'axe des colliers pour que ceux-ci soient définitivement vissés. Les opérations à effectuer demandaient donc plus de dextérité de la part des opérateurs, ce qui peut expliquer une familiarisation plus réduite en environnement virtuel (comparée à l'étude sur la coprésence).

7.3.4.3 Sécurité

Les résultats des questions sur la sécurité sont disponibles sur la Figure 7.30.

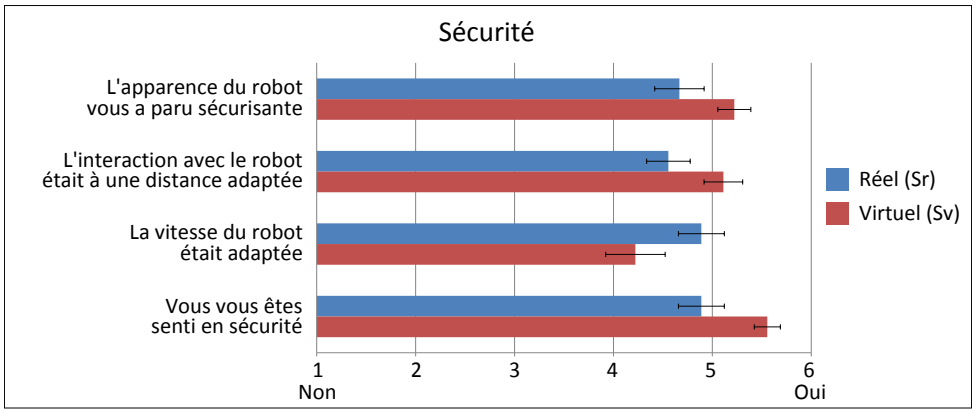


FIGURE 7.30 – Les résultats du questionnaire Q_s pour les questions sur la sécurité

Aucune différence significative n'a été décelée dans les réponses au question. On peut cependant noter une meilleure impression de sécurité en environnement virtuel concernant l'apparence du robot, la distance avec le robot et l'impression générale de sécurité. Ceci peut s'expliquer par

le fait que le sentiment de danger était moins fort en environnement virtuel : les opérateurs ne se sentaient pas agressés par le robot virtuel et savaient qu'aucun accident physique ne pouvait arriver. Ceci montre que la notion de sécurité perçue doit être considérée avec prudence lorsque l'on effectue des tests en environnement virtuel.

Seule la vitesse du robot a été perçue moins adaptée en environnement virtuel : les opérateurs ont souvent considéré que le robot était plus lent en environnement virtuel. Cette impression est probablement due au fait que certaines tâches virtuelles étaient effectuées plus rapidement par l'opérateur, donnant le sentiment d'attendre le robot lorsqu'il apportait les pièces.

7.3.4.4 Acceptabilité

La question sur l'acceptabilité est représentée sur la Figure 7.31.

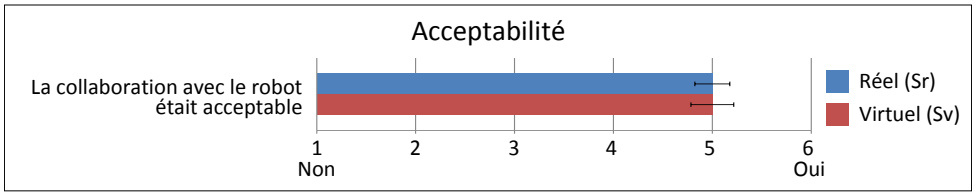


FIGURE 7.31 – Les résultats du questionnaire Q_s pour les questions sur l'acceptabilité

Aucune différence n'est apparue entre la situation réelle et la situation virtuelle : les opérateurs ont considéré que la collaboration était acceptable dans les deux situations de manière équivalente. On peut aussi noter que les réponses étaient globalement élevées en absolu (environ 5 sur 6) : ceci montre que la configuration de travail avec le robot a été globalement bien perçue.

7.3.5 Résultats des mesures physiologiques

Des mesures physiologiques étaient captées sur les opérateurs pour estimer leur état affectif au cours des tests. Les mesures physiologiques utilisées étaient le rythme cardiaque (calculé à l'aide du PPG) et la conductance de la peau (électrodes EDA). Ces mesures ne pouvaient pas être prises pendant le montage des pièces : l'acquisition s'effectuait sur les doigts des opérateurs et le mouvement des mains pendant les opérations empêchait d'obtenir un signal stable et non bruité. Ces mesures étaient donc acquises quand l'opérateur était au repos (voir le protocole du Tableau 7.4) : au début de chaque scénario (ϕ_0) et à l'issue de chaque cycle de 5 assemblages (ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3, pour chaque configuration : manuelle C_1 ou automatique C_2). L'opérateur était alors assis et ses mains reposaient sur une table face à lui. Les mesures étaient récoltées immédiatement après la finalisation du dernier montage du cycle, pendant 2 à 3 minutes. C'était également le temps nécessaire aux coordinateurs pour remettre en place les pièces de montage. Ainsi, pour chaque scénario, un total de sept acquisitions étaient réalisées, pour un total de 42 acquisitions sur la journée par opérateur (7 acquisitions $\times$ 3 scénarios $\times$ 2 demi-journées).

Pour chaque acquisition, les indicateurs utilisés étaient la moyenne du rythme cardiaque et la moyenne de la conductance de la peau, générées sur la première minute des acquisitions. A l'issue des tests, l'état affectif de chaque opérateur était ainsi décrit par 42 indicateurs pour le rythme cardiaque et 42 indicateurs pour la conductance de la peau. Afin d'unifier les résultats entre opérateurs, il a fallu normaliser les indicateurs obtenus. Pour chaque opérateur, la valeur minimum m et la valeur maximum M sur les 42 indicateurs étaient générées, puis chaque indicateur était normalisé entre ces deux valeurs. Dans la suite de l'analyse des mesures physiologiques,

seuls les indicateurs ϕ_1, ϕ_2 et ϕ_3 ont été pris en compte (les valeurs ϕ_0 ont uniquement servi à la normalisation des mesures par opérateur).

La Figure 7.32 représente les résultats issus des mesures physiologiques. Pour chaque scénario et chaque configuration de contrôle, la moyenne sur les valeurs normalisées ϕ_1, ϕ_2 et ϕ_3 et sur tous les opérateurs est affichée. Pour notre étude, il convient de comparer les configurations de contrôle (manuelle C_1 et automatique C_2), les scénarios de collaboration (S_1, S_2 et S_3) et les situations d'expérimentation (réelle S_r et virtuelle S_v). Plusieurs analyses de variance à deux variables ont été menées pour analyser les différences significatives entre configurations, entre scénarios ou entre situations d'expérimentations (les résultats des tests statistiques sont disponibles en Annexe E).

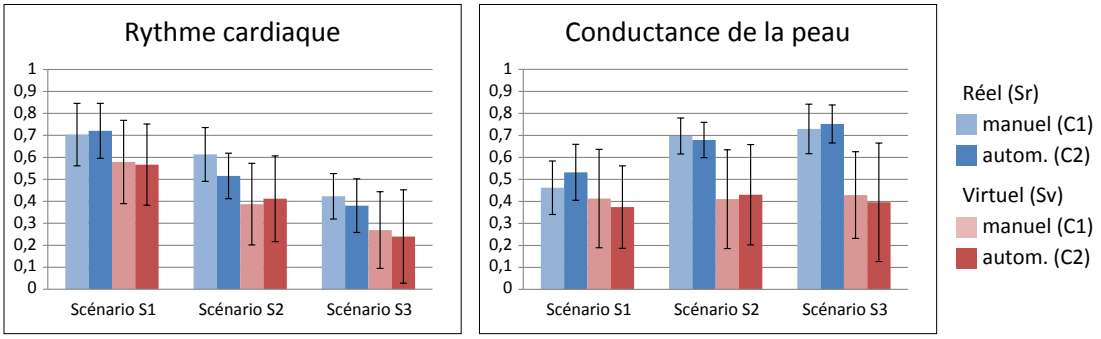


FIGURE 7.32 – Les résultats des données liées aux mesures physiologiques

Plusieurs différences significatives ont été décelées entre les situations d'expérimentation (réelle ou virtuelle). Le rythme cardiaque et la conductance de la peau semblaient notamment plus bas en environnement virtuel. Ceci peut signifier que l'activité physique était moins intense en environnement virtuel et que le stress ressenti était plus faible. Cependant, ces différences sont à analyser avec précaution : les mesures physiologiques étaient recueillies à des moments différents de la journée de test (deux demi-journées). Ces différences peuvent donc aussi correspondre à des variations dues aux activités de la journée (réveil, repas) et dépendantes de chaque opérateur. Une meilleure analyse des résultats entre situations d'expérimentation nécessiterait d'utiliser d'autres méthodes de normalisation des mesures (notamment par demi-journées) et pourrait constituer une perspective dans nos travaux futurs. Pour notre étude actuelle, nous nous intéressons surtout à comparer les scénarios de collaboration (S_1, S_2 et S_3) et les configurations de contrôle (C_1 et C_2) et à déterminer si les mêmes tendances se retrouvent en situation virtuelle et en situation réelle. Il s'agit donc d'une comparaison relative entre situations d'expérimentation (réelle et virtuelle) plutôt qu'une comparaison absolue.

Concernant les configurations de contrôle du robot (C_1 ou C_2), peu de différences significatives semblent apparaître pour chaque scénario. Le fait de devoir appuyer sur des boutons n'a pas eu d'influence sur l'état affectif des opérateurs.

Une influence du scénario de collaboration sur le rythme cardiaque des opérateurs a été mise en avant par les tests statistiques. En effet, il semble que le rythme cardiaque des opérateurs diminue avec le niveau d'interaction du scénario. Ceci peut être expliqué par le fait que si l'interaction avec le robot était forte et que l'assistance proposée par le robot était élevée, la tâche de l'opérateur était soulagée. Notamment pour le scénario S_3, pour lequel le rythme cardiaque était le plus bas, le maintien par le robot du raccord intérieur a permis aux opérateurs de reposer l'un de leurs bras (le bras gauche). C'est l'assistance du robot qui a soulagé la tâche des opérateurs et qui a provoqué une baisse du rythme cardiaque. Il est aussi intéressant de

noter que le même phénomène est apparu en environnement réel et en environnement virtuel : les opérations à effectuer en environnement virtuel, même si elles étaient simplifiées, restaient fidèles aux opérations réelles et l'assistance proposée par le robot était la même. La baisse du rythme cardiaque des opérateurs lorsque le robot les assistait est donc également apparue en environnement virtuel.

En ce qui concerne la conductance de la peau, une influence du scénario de collaboration a égelement été décelée. Plus le niveau d'interaction avec le robot était fort, plus la conductance de la peau était élevée. Ceci peut être interprété par un plus haut niveau de stress lorsqu'il s'agissait d'interagir avec le robot et à une plus forte appréhension. Cette tendance n'est pas apparue en environnement virtuel : le contact physique avec une pince de robot réel n'a pas engendré pas les mêmes réactions et les mêmes appréhensions que l'interaction avec une pince de robot virtuel.

Les résultats liés aux mesures physiologiques ont donc montré une baisse du rythme cardiaque due à l'assistance du robot et une hausse de l'appréhension due à l'interaction avec le robot. L'analyse des ces résultats est cependant à nuancer par l'ordre des scénarios au cours de nos tests. En effet, par mesure pratique et par manque d'opérateurs disponibles, les scénarios ont toujours été présentés dans le même ordre : S_1, S_2 puis S_3. Il est possible que cet ordre imposé ait joué dans les tendances observées liées aux mesures physiologiques. Dans la suite de nos travaux, il serait intéressant de modifier l'ordre de passage des scénarios pour déterminer si cet ordre a un impact sur les résultats obtenus.

7.3.6 Synthèse des résultats

Les résultats des questionnaires sur les scénarios de collaboration et les configurations de contrôle ont montré plusieurs points. Premièrement, les configurations de contrôle automatique du robot ont été trouvées les plus acceptables du point de vue des opérateurs : elles imposaient moins de contraintes, rendaient le robot plus utile et l'opérateur plus efficace dans son travail.

Deuxièmement, il avait été envisagé qu'un scénario de collaboration dans lequel le robot assistait l'opérateur dans sa tâche aurait été perçu plus utile et plus acceptable. Cependant, même si chaque scénario a été perçu avec un niveau d'interaction différent, peu de différences significatives ont été trouvées entre les scénarios concernant l'utilisabilité, l'utilité ou l'acceptabilité. Un point intéressant concerne la sécurité perçue : les opérateurs ne voyaient pas de danger à travailler en interaction forte avec le robot.

Enfin, peu de différences significatives ont été trouvées entre la situation réelle et la situation virtuelle. Les mêmes tendances ont été retrouvées dans les questionnaires entre la situation réelle et la sitution virtuelle, même si les différences observées étaient peut-être plus réduites en virtuel pour l'utilisabilité et la sécurité perçue. Les opérateurs étaient également légèrement moins à l'aise avec les opérations virtuelles à effectuer. Globalement, on peut considérer que la réalité virtuelle a recueilli des impressions subjectives d'utilisateurs de manière reproductible à la situation réelle, mais certaines subtilités ne sont apparue qu'en situation réelle (préhension des pièces).

Les mesures physiologiques recueillies au cours des tests ont également permis de tirer des conclusions intéressantes, complétant celles des questionnaires, notamment en ce qui concerne les scénarios d'interaction. Tout d'abord, le rythme cardiaque des opérateurs a diminué de manière significative avec l'assistance proposée par le robot : ceci montre une baisse des effort fournis par les opérateurs. Deuxièmement, la conductance de la peau (et donc le niveau d'appréhension) des opérateurs a augmenté avec l'interaction avec le robot : les opérateurs semblaient avoir plus d'appréhension à interagir avec le robot, ce qui ne les a pas empêchés de collaborer efficacement.

Enfin, les mêmes tendances ont été observées en situation réelle et en situation virtuelle, seulement pour le rythme cardiaque : les opérations virtuelles étaient bien soulagées par l'assistance du robot, mais les opérateurs avaient moins d'appréhension vis-à-vis de l'interaction avec un robot virtuel.

7.4 Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons étudié des situations qui vont au-delà de la simple coprésence entre un humain et un robot et qui se rapprochent plus de la collaboration homme-robot. Deux cas d'étude ont été mis en place en s'inspirant de situations de postes d'assemblage. Dans ces cas d'étude, un humain et un robot sont face à face et doivent travailler ensemble pour préparer des pièces.

Le premier cas d'étude a été mis en place spécifiquement pour évaluer l'influence de l'apparence et des mouvements des robots sur l'acceptabilité du travail collaboratif par les utilisateurs. Ce cas d'étude consistait en un échange d'objets entre un humain et un robot et a été mené uniquement en environnement virtuel. Au cours de tests, différentes apparences de robots ont été proposées aux utilisateurs, ainsi que deux profils de mouvements différents : proches d'une machine ou proches d'un humain. Les résultats des tests ont montré que les utilisateurs préféraient interagir avec des robots d'apparence anthropomorphe. De plus, l'appréciation des mouvements des robots (entre proches d'une machine et proches d'un humain) dépendait de l'apparence des robots. Les mouvements anthropomorphes ont été bien perçus lorsqu'ils s'appliquaient à un robot d'apparence industrielle, tandis que ces mêmes mouvements ont perturbé les utilisateurs lorsqu'ils s'appliquaient à un robot d'apparence plus anthropomorphe. Ces résultats rejoignent en quelque sorte le concept de la vallée dérangeante, qui stipule qu'un robot trop anthropomorphe peut nuire au degré de familiarisation avec les utilisateurs.

Le deuxième cas d'étude s'est concentré sur une situation plus concrète inspirée des postes de montage. Un opérateur et un robot devaient collaborer pour assembler des raccords d'air de moteur : le robot amenait les pièces tandis que l'opérateur les assemblait, éventuellement assisté par le robot. L'objectif des tests était de comparer plusieurs scénarios de collaboration, à la fois en situations réelle et virtuelle. Ces scénarios de collaboration se focalisaient sur différents niveaux de distribution temporelle entre l'opérateur et le robot (synchrone, asynchrone) et sur différents degrés de contrôle des étapes du robot (manuel, automatique). Les résultats ont montré que les opérateurs préféraient que le robot fonctionne de manière automatique : ceci imposait moins de contraintes et rendait le robot plus utile et la collaboration plus acceptable. Les opérateurs ne semblent pas avoir été sensibles aux différents niveaux d'interaction avec le robot, même si l'assistance du robot a réduit les efforts fournis (baisse du rythme cardiaque) tout en augmentant leur niveau de stress (hausse de la conductance de la peau). Enfin, la comparaison entre situation réelle et situation virtuelle a révélé peu de différences dans les résultats, même si les tendances observées semblent atténuées en environnement virtuel concernant la sécurité perçue (pas de hausse du stress).

Synthèse

Chapitre 8

Synthèse et discussions

La première partie de ce manuscrit a permis d'exposer deux problématiques à l'issue du Chapitre 4. Dans la deuxième partie, le Chapitre 5 a décrit les outils utilisés pour mettre en place nos cas d'étude et mener nos expérimentations, tandis que les Chapitres 6 et 7 ont présenté les résultats issus de ces expérimentations.

Dans ce chapitre, nous proposons de synthétiser l'ensemble des résultats en tentant de répondre aux deux problématiques de la thèse, concernant les critères importants de l'acceptabilité de la collaboration homme-robot et la validation de notre méthodologie à base de réalité virtuelle, de questionnaires et de mesures physiologiques.

Problématique 1
Du point de vue des opérateurs, dans un contexte industriel, quelles sont les composantes importantes de l'acceptabilité de la collaboration homme-robot et comment sont-elles influencées ?

Problématique 2
Une méthodologie basée sur des tests utilisant la réalité virtuelle, des questionnaires et des mesures physiologiques est-elle pertinente pour évaluer l'acceptabilité de la collaboration homme-robot ?

Dans un premier temps, nous proposons de répondre à chaque problématique indépendamment et d'en donner les limites et les perspectives éventuelles. Puis nous entamons des discussions sur différents points de notre recherche.

8.1 Les critères d'acceptabilité

A l'issue de la première partie de ce manuscrit (Chapitre 4), nous avons clairement établi l'approche de notre recherche comme étant l'étude de l'acceptabilité de la collaboration homme-robot, essentiellement en environnement industriel et du point de vue des opérateurs. Cette approche nous a conduits à formuler une première problématique, qui consiste en la détermination des composantes importantes de l'acceptabilité du point de vue des opérateurs.

Pour aborder cette problématique, nous utilisons les résultats de chacune de nos expérimentation en considérant l'influence qu'ont pu avoir différents facteurs de notre étude sur les composantes de l'acceptabilité.

8.1.1 Les composantes et les facteurs de l'acceptabilité

8.1.1.1 Les composantes de l'acceptabilité

Dans notre étude, nous nous sommes placés essentiellement du point de vue des utilisateurs et des opérateurs. C'est pourquoi nous avons considéré essentiellement des notions subjectives dans l'acceptabilité. Nous ne désirions pas évaluer des notions objectives des systèmes de collaboration homme-robot (efficacité, sécurité), comme le font les entreprises utilisant ces systèmes, mais bien des ressentis subjectifs de la part des opérateurs.

Dans chacune de nos expérimentations, les questionnaires posés aux utilisateurs ou aux opérateurs reprenaient des composantes générales de l'acceptabilité (regroupant une ou plusieurs questions), que l'on peut diviser en composantes utilitaires (utilisabilité, utilité perçue, efficacité perçue) et en composantes hédonistes (sécurité perçue, sentiment de relaxation, sentiment de satisfaction). La Figure 8.1 résume les composantes principales de l'acceptabilité que nous avons tenté d'évaluer au cours de nos expérimentations, du point de vue des utilisateurs.

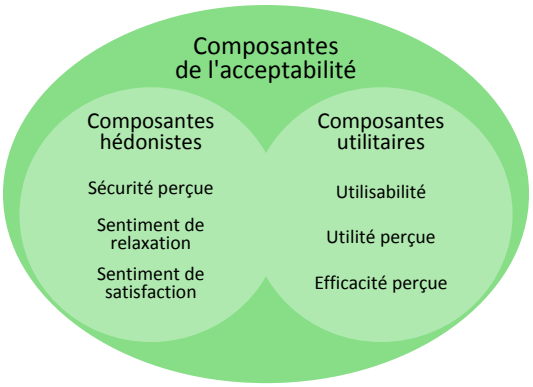


FIGURE 8.1 – Les différentes composantes de l'acceptabilité

L'objectif de cette analyse globale est de comprendre le contenu de ces composantes et de déterminer si les opérateurs les ont perçues avec le même degré d'importance. Certaines composantes de l'acceptabilité sont notamment sensibles à certains facteurs plus que d'autres. Il est donc nécessaire de considérer aussi les différents facteurs qui rentrent en jeu dans l'acceptabilité.

8.1.1.2 Les facteurs de l'acceptabilité

Plusieurs facteurs peuvent influencer l'acceptabilité de collaborer avec des robots. On peut considérer deux groupes principaux de facteurs : ceux liés au robot et ceux liés à la configuration de collaboration.

Les expérimentations que nous avons menées ont chacune ciblé des facteurs différents. Les facteurs liés aux robots se sont intéressés à leur apparence, leurs mouvements, leur niveau d'anthropomorphisme ainsi que leur niveau d'intelligence. Les facteurs liés à la configuration de collaboration ont concerné la distribution spatiale du robot et de l'opérateur, la distribution temporelle des tâches, le niveau d'interaction et le niveau de contrôle sur la tâche du robot. La Figure 8.2 présente un récapitulatif de l'ensemble des facteurs étudiés au cours de nos expérimentations.

Dans ce chapitre, nous proposons une analyse globale permettant de déterminer quel a été l'impact de ces différents facteurs sur les composantes de l'acceptabilité et s'ils ont tous agi

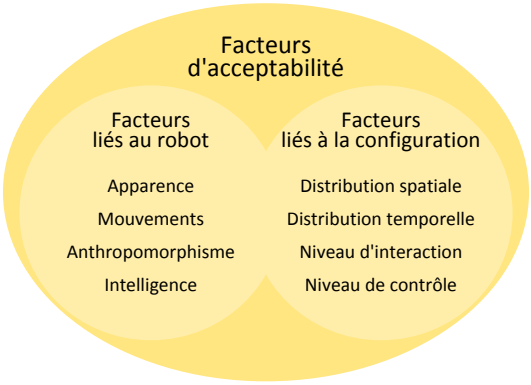


FIGURE 8.2 – Les facteurs pouvant influencer l'acceptabilité

au même niveau et avec le même degré d'importance sur l'acceptabilité du point de vue des opérateurs. La Figure 8.3 représente l'influence que l'on cherche à analyser.

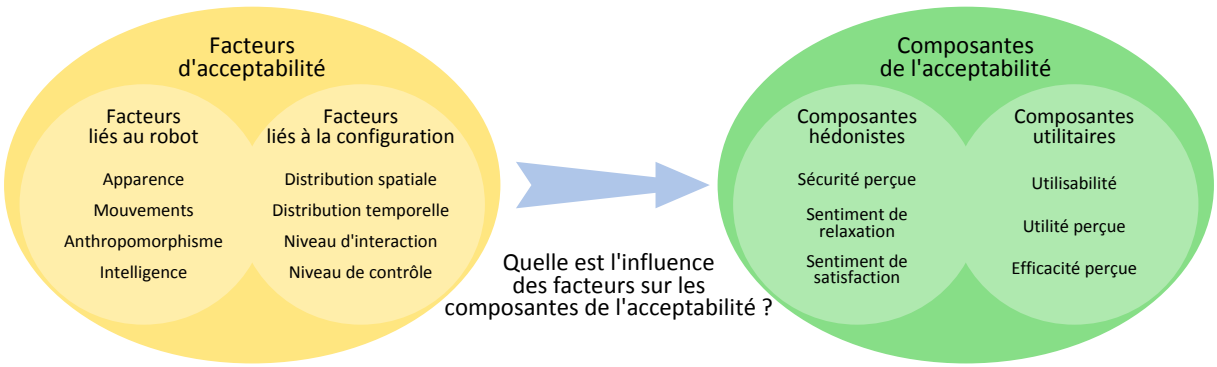


FIGURE 8.3 – Le but de notre analyse : quelle est l'influence des différents facteurs sur les composantes de l'acceptabilité ?

8.1.2 Les apports de notre étude

Afin d'analyser l'influence de différents facteurs sur l'acceptabilité, nous revenons sur les résultats issus de nos expérimentations. Nous orientons cette analyse autour des facteurs liés au robot et des facteurs liés à la configuration de collaboration.

8.1.2.1 Facteurs liés au robot

Deux de nos expérimentations se sont intéressées à des facteurs liés au robot dans l'étude de l'acceptabilité. La première expérimentation s'est focalisée sur les mouvements des robots en situation de coprésence, tandis que la deuxième expérimentation s'est concentrée sur l'influence de l'apparence des robots et de leurs mouvements (voir Figure 8.4).

Le but de la première expérimentation était de comparer différents profils de mouvements d'un robot, de déterminer lesquels étaient perçus les plus anthropomorphes ou les plus naturels et d'évaluer leur influence sur des aspects de sécurité, de relaxation et d'impression générale. Les résultats ont montré que les utilisateurs préféraient des mouvements de robots dont l'effecteur

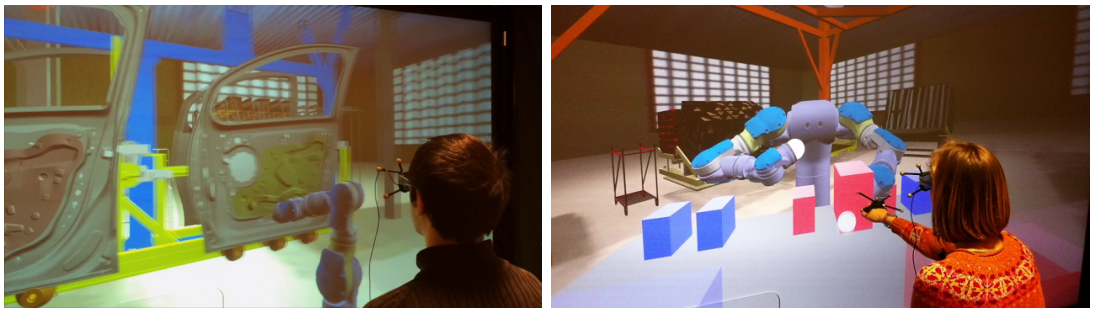


FIGURE 8.4 – Les expérimentations sur les facteurs liés au robot : les profils de mouvements et l'apparence des robots

était souple au cours du mouvement. Ce type de mouvements a engendré une plus grande satisfaction de la part des utilisateurs, une plus grande relaxation ainsi qu'une meilleure impression de sécurité. En revanche, le fait d'avoir un mouvement souple au niveau de l'effecteur n'a pas influencé la perception que se faisaient les utilisateurs du niveau de compétence et d'efficacité du robot.

Dans la deuxième expérimentation, les utilisateurs devaient comparer des robots d'apparences différentes ayant chacun des profils de mouvements différents, selon divers degrés d'anthropomorphisme. Tout d'abord, l'impression générale des utilisateurs était plus satisfaisante lorsqu'ils devaient interagir avec des robots d'apparence anthropomorphe plutôt qu'industrielle. Les utilisateurs se sentaient également plus relaxés et plus en sécurité en présence de ces robots. En revanche, l'apparence des robots n'a pas influencé leur niveau de compétence perçu. Vis-à-vis des mouvements des robots, les résultats sont plus mitigés. Les utilisateurs ont bien décelé différents niveaux d'anthropomorphisme, mais les mouvements étudiés semblent avoir eu relativement peu d'impact sur la relaxation des utilisateurs ou leur impression de sécurité. Les utilisateurs ont parfois préféré interagir avec des mouvements mécaniques, notamment lorsque l'apparence des robots était anthropomorphe.

Les résultats issus de ces expérimentations montrent plusieurs points. D'une part, différentes apparences de robots, avec différents profils de mouvements et différents niveaux d'anthropomorphisme, ont eu un impact sur le sentiment de satisfaction des utilisateurs, leur relaxation et leur impression de sécurité. D'autre part, ces facteurs semblent avoir eu peu d'influence sur le niveau de compétence perçu des robots et leur efficacité perçue. Ces réflexions semblent montrer que les facteurs liés au robot ont plus d'impact sur des composantes hédonistes de l'acceptabilité que des composantes utilitaires.

Cependant, en plus des deux expérimentations décrites ci-dessus, on peut tout de même noter que l'expérimentation sur le montage de raccords d'air en collaboration avec un robot, étudiant la distribution temporelle des tâches, a également fait intervenir des facteurs liés au robot. En effet, dans cette expérimentation, lors du fonctionnement du robot en mode automatique, les opérateurs se représentaient le robot avec un niveau d'intelligence plus élevé : l'utilité perçue du robot et de la collaboration s'en trouvait alors améliorée. Certains facteurs liés au robot peuvent ainsi avoir une influence sur des composantes utilitaires de l'acceptabilité, mais l'étendue de nos expérimentations reste trop faible pour pouvoir apporter plus de résultats (voir les perspectives de la Section 8.3).

Les conclusions sur l'influence des facteurs liés au robot sont schématisées sur la Figure 8.5, en distinguant la situation de coprésence et la situation de collaboration étudiées.

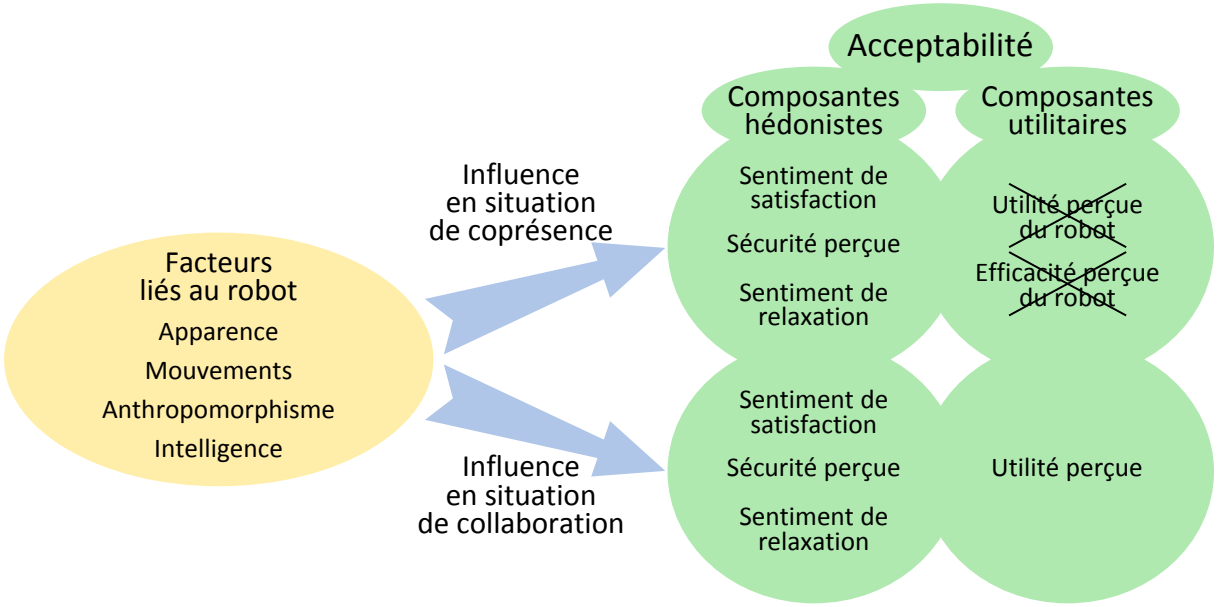


FIGURE 8.5 – L'influence des facteurs liés au robot sur les composantes de l'acceptabilité

8.1.2.2 Facteurs liés à la configuration de collaboration

Deux de nos expérimentations se sont concentrées sur des facteurs liés à la configuration de collaboration. Ce sont les expérimentations inspirées de cas concrets de poste de montage (voir Figure 8.6). La première expérimentation concerne le montage de porte en coprésence avec un robot et s'est intéressée à la distribution spatiale du robot et de l'opérateur. La deuxième expérimentation correspond au montage de raccords d'air en collaboration avec un robot et a comparé différentes distributions temporelles des tâches entre le robot et l'opérateur.

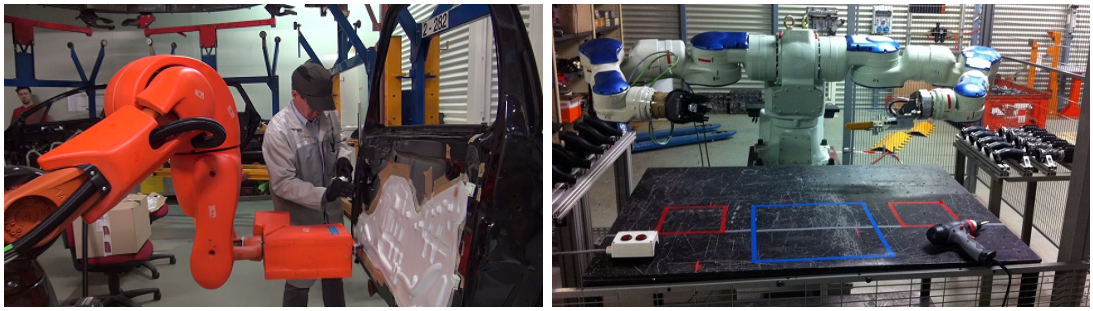


FIGURE 8.6 – Les expérimentations sur les facteurs liés à la configuration de collaboration : la distribution spatiale et la distribution temporelle de l'opérateur et du robot

Dans la première expérimentation, l'objet de l'étude était la distribution spatiale du robot et de l'opérateur : les opérateurs devaient travailler en coprésence avec un robot selon deux configurations, éloignée ou proche du robot. Les résultats ont montré que la configuration proche du robot imposait plus de contraintes aux opérateurs (baisse d'utilisabilité) et engendrait une impression de sécurité plus faible, ce qui réduisait l'acceptabilité de la configuration. Les opérateurs étaient également plus stressés lorsqu'ils devaient travailler proche du robot. En revanche, le fait de travailler proche ou loin du robot n'a pas eu d'impact sur le niveau de compétence

perçu du robot : efficacité, utilité.

Dans la deuxième expérimentation, les opérateurs devaient travailler en collaboration avec un robot selon différentes configurations de distribution temporelle des tâches, faisant intervenir différents niveaux d'interaction et différents niveaux de contrôle des étapes du robot. De manière générale, les opérateurs ont préféré les situations dans lesquelles le robot fonctionnait de manière automatique : ceci autorisait une interaction plus fluide et sans contrainte (gain d'utilisabilité), le robot était considéré plus utile et les opérateurs se sentaient plus efficaces. L'acceptabilité de la configuration de travail s'en trouvait donc améliorée. Les efforts des opérateurs étaient également soulagés lorsque le robot les assistait dans la tâche d'assemblage. Les opérateurs ne voyaient pas a priori de danger à travailler en interaction physique avec le robot, même si leur niveau de stress augmentait lorsque l'interaction avec le robot était forte.

Les résultats issus de ces deux expérimentations montrent plusieurs points. D'une part, la notion d'utilisabilité a été celle à laquelle les opérateurs étaient les plus sensibles lors de l'interaction avec un robot : un système utilisable ne devait pas imposer de contraintes ni demander aux opérateurs de s'adapter à certaines situations. La notion de sécurité perçue a également joué un rôle important dans l'acceptabilité : une situation éloignée du robot ainsi qu'un robot d'intelligence développée semblent avoir été des gages d'une meilleure impression de sécurité. Les composantes d'utilisabilité et de sécurité perçue sont intervenues à la fois dans les situations de coprésence (première expérimentation) et de collaboration (deuxième expérimentation). La situation de collaboration a également fait intervenir des composantes supplémentaires : l'utilité perçue et l'efficacité perçue. Ceci semble cohérent puisque l'interaction et la collaboration avec le robot étaient plus fortes dans cette situation et ont révélé des subtilités supplémentaires par rapport à la situation de coprésence.

Pour résumer, les différentes influences démontrées par ces expérimentations sont représentées sur la Figure 8.7. En premier lieu, les facteurs liés à la configuration de collaboration ont eu un impact plus fort sur des composantes utilitaires de l'acceptabilité, essentiellement l'utilisabilité. Dans un second temps, les composantes hédonistes ont également été influencées : impression de sécurité, relaxation. Par rapport aux situations de coprésence, les situations de collaboration ont également fait intervenir des composantes supplémentaires de l'acceptabilité, comme l'utilité perçue et l'efficacité perçue, mais dont l'importance semblait toujours plus faible que celle de l'utilisabilité.

8.1.3 Synthèse

La première problématique posée au début de la thèse concernait les composantes importantes entrant en jeu dans l'acceptabilité de la collaboration homme-robot, du point de vue des opérateurs. Nous avons orienté notre réflexion autour de deux points :

- Les composantes de l'acceptabilité, divisées en composantes hédonistes et utilitaires ;
- Les facteurs influençant ces composantes, divisés en facteurs liés au robot et en facteurs liés à la configuration de collaboration.

Dans chacune de nos expérimentations, nous avons tenté d'évaluer plusieurs composantes de l'acceptabilité, à la fois hédonistes et utilitaires. Nous avons également considéré différents facteurs, à la fois liés au robot (apparence et mouvements) et liés à la configuration de collaboration (distribution spatiale, distribution temporelle).

Au niveau des facteurs liés au robot, les composantes de l'acceptabilité ayant été influencées étaient essentiellement des composantes hédonistes : le sentiment de satisfaction, l'impression de sécurité et le niveau de relaxation des utilisateurs. Le niveau de compétence perçu du robot semble avoir été peu influencé par ce type de facteurs. Certaines composantes utilitaires de

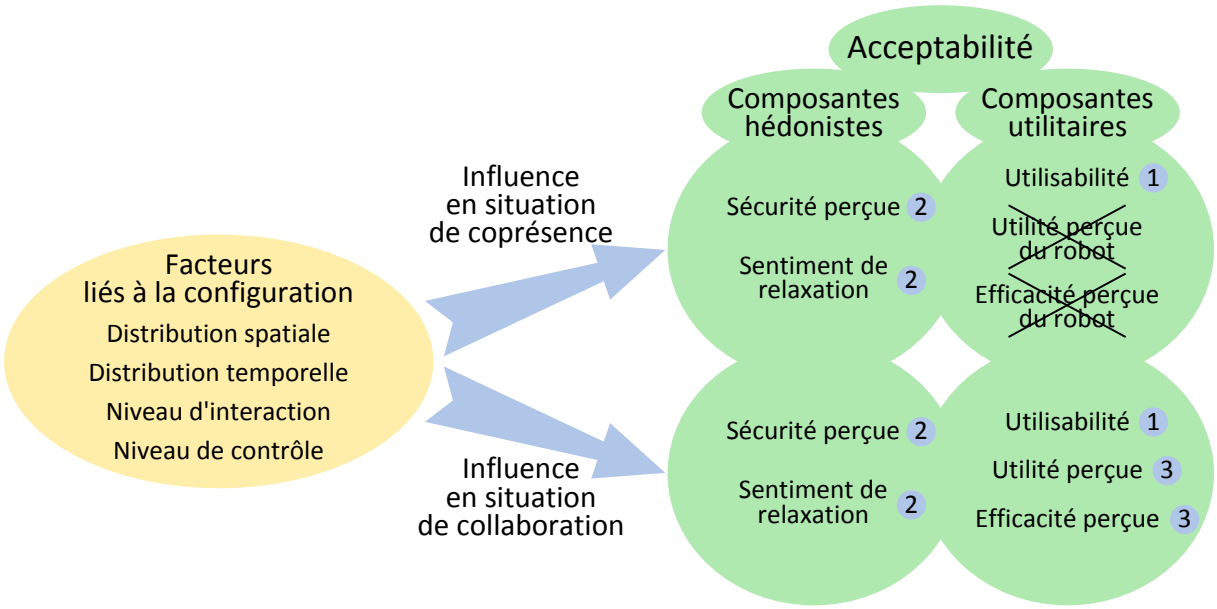


FIGURE 8.7 – L'influence de facteurs liés à la configuration de collaboration sur les composantes de l'acceptabilité. Les chiffres correspondent à l'ordre d'importance des composantes du point de vue des opérateurs.

l'acceptabilité, telles que l'utilité perçue, ont éventuellement pu être influencées par des facteurs liés au robot, comme son niveau d'intelligence perçu.

Les facteurs liés à la configuration de collaboration semblent avoir eu une influence plus forte sur des composantes utilitaires de l'acceptabilité, essentiellement sur l'utilisabilité. Les composantes hédonistes étaient également influencées dans un second temps : sécurité perçue, relaxation. Enfin, une situation de collaboration plus forte avec le robot (par rapport à une situation de coprésence) a permis de révéler des influences supplémentaires sur l'acceptabilité, notamment sur l'utilité perçue et l'efficacité perçue.

8.2 La validation de notre méthodologie

L'étude de l'acceptabilité de la collaboration homme-robot, du point de vue des opérateurs, requiert de mener des tests utilisateurs sur des cas d'étude variés. Afin de tester le maximum de conditions et de facteurs possible, nous avons proposé d'utiliser la réalité virtuelle pour simuler des configurations de collaboration homme-robot, tout en garantissant une immersion et une interaction pseudo-naturelles aux opérateurs dans les environnement simulés. Afin d'évaluer l'acceptabilité et ses différentes composantes, nous avons proposé d'utiliser des questionnaires pour recueillir les impressions subjectives des opérateurs et des mesures physiologiques (rythme cardiaque, conductance de la peau) pour obtenir leur état affectif.

La méthodologie que nous avons proposée, avec l'utilisation de la réalité virtuelle, de questionnaires et de mesures physiologiques, a amené la deuxième problématique de la thèse, concernant la validité de cette méthodologie. La réponse à cette problématique nous a notamment amenés à réaliser des expérimentations à la fois en environnement réel et en environnement virtuel, avec des situations identiques, afin de comparer les résultats et valider la pertinence des tests virtuels.

Nous revenons sur l'ensemble des conclusions issues de la Section 8.1 sur les facteurs et les composantes de l'acceptabilité. Il s'agit de considérer comment notre méthodologie s'est appliquée ou non à révéler l'ensemble de ces conclusions :

- Qu'ont permis de montrer les questionnaires ?
- Qu'ont permis de révéler les mesures physiologiques ?
- Qu'ont permis de montrer les situations réelles par rapport aux situations virtuelles et/ou inversement ?

8.2.1 L'utilisation des questionnaires

8.2.1.1 Apport des questionnaires

La manière la plus directe d'évaluer l'acceptabilité de la collaboration homme-robot, du point de vue des utilisateurs et des opérateurs, consiste à utiliser des questionnaires. Dans nos expérimentations, il est apparu que les questionnaires étaient des bons indicateurs des composantes de l'acceptabilité. Les conclusions principales issues de la Section 8.1 ont en effet été tirées des réponses aux questionnaires. La présence ou l'absence de différences significatives dans les résultats aux questions permettaient de déterminer quelles composantes de l'acceptabilité étaient pertinentes du point de vue des utilisateurs.

Pour les expérimentations analysant des facteurs liés au robot, ces questionnaires ont mis en valeur une influence sur les composantes hédonistes de l'acceptabilité : le sentiment de satisfaction, l'impression de sécurité, le sentiment de relaxation.

Pour les expérimentations analysant des facteurs liés à la configuration de collaboration, les questionnaires ont essentiellement permis de cibler des différences significatives concernant les composantes utilitaires de l'acceptabilité : les contraintes imposées, la nécessité de s'adapter. Les questionnaires ont également permis de déceler des différences significatives dans les composantes hédonistes, mais à un degré moins important que les composantes utilitaires.

8.2.1.2 Limites et perspectives

Dans chacune de nos expérimentations, les questionnaires n'ont cependant pas toujours traité toutes les composantes de l'acceptabilité. Dans les expérimentations sur les facteurs liés au robot, certaines composantes comme l'utilisabilité ou l'utilité perçue étaient peu considérées. Pour les expérimentations sur les facteurs liés à la configuration de collaboration, peu de questions étaient posées sur le sentiment de satisfaction. Ces choix avaient été faits car les objectifs de chaque étude étaient différents. Il serait intéressant de mener des études supplémentaires en rajoutant quelques items aux questionnaires.

De plus, les questionnaires semblent avoir mis en avant l'importance des composantes utilitaires de l'acceptabilité devant les composantes hédonistes. Mais ceci est probablement révélateur d'un biais dans les réponses aux questionnaires : les participants aux tests n'avaient parfois pas le recul nécessaire pour estimer s'ils étaient satisfaits ou s'ils se sentaient stressés, ou ne voulaient tout simplement pas le montrer dans les questionnaires. C'est pourquoi des mesures physiologiques ont également été utilisées au cours des expérimentations.

8.2.2 L'utilisation des mesures physiologiques

8.2.2.1 Apport des mesures physiologiques

Dans nos expérimentations, les mesures physiologiques ont essentiellement permis d'estimer les états affectifs des opérateurs en situation de coprésence ou de collaboration avec un robot et ont permis d'obtenir des informations supplémentaires sur les composantes hédonistes de l'acceptabilité (sécurité perçue, sentiment de relaxation) et ses composantes utilitaires (efforts soulagés).

Des mesures physiologiques ont été recueillies au cours de l'expérimentation sur l'apparence des robots et leurs mouvements. Le Chapitre 7 a permis d'en analyser quelques tendances intéressantes. Cependant, les résultats de ces expérimentations sont restés peu significatifs et il serait imprudent d'en tirer une généralisation. L'apport des mesures physiologiques pour l'évaluation de l'influence de facteurs liés au robot semble donc mitigé (voir les limites et perspectives de la Section 8.2.2.2).

Pour les facteurs liés à la configuration de collaboration, les mesures physiologiques ont permis d'analyser l'activité des opérateurs. La conductance de la peau a été un bon indicateur du niveau de stress des opérateurs (essentiellement en environnement réel), notamment pour l'expérimentation sur le montage de porte en coprésence avec un robot : certains opérateurs étaient véritablement stressés lorsqu'ils étaient proches du robot et la conductance de la peau a bien permis de rendre compte de cet état. Pour l'expérimentation sur le montage de raccords d'air, les scénarios mettant en œuvre une interaction forte avec le robot ont provoqué une conductance plus élevée, signifiant une appréhension plus importante (et inconsciente) vis-à-vis du robot. Ce résultat n'était pas apparu dans les questionnaires.

Dans un contexte d'acceptabilité, l'apport du rythme cardiaque ne s'est pas fait en termes de stress ressenti mais d'efforts soulagés. En effet, le rythme cardiaque varie surtout en fonction de l'intensité de la tâche. Pour le montage de porte en coprésence avec un robot, les tâches effectuées étaient toujours les mêmes et peu de variations du rythme cardiaque sont apparues. Pour le montage de raccords d'air en collaboration avec un robot, l'assistance du robot a pu soulager les efforts des opérateurs et une baisse du rythme cardiaque a pu révéler ces efforts soulagés, alors que les questionnaires n'avaient pas permis de mettre en valeur ce résultat.

8.2.2.2 Limites et perspectives

Concernant les facteurs liés au robot, l'absence de différences significatives dans les mesures physiologiques est à nuancer par plusieurs points. Premièrement, l'étendue de nos expérimentations reste encore restreint. Concernant les facteurs liés au robot, seule l'expérimentation sur l'apparence et les mouvements a utilisé des mesures physiologiques : il faudrait étudier d'autres situations de coprésence ou de collaboration ainsi que l'influence d'autres facteurs. Deuxièmement, les expérimentations sur les facteurs liés au robot ont été menées uniquement en environnement virtuel, ce qui peut expliquer l'absence de résultats significatifs dans les mesures physiologiques. Cette deuxième raison est de plus soutenue par le fait que, dans la littérature, des études sur les mouvements des robots, menées en environnement réel, ont obtenu des résultats significatifs au niveau de mesures physiologiques [Kulić et Croft, 2007; Zanchettin *et al.*, 2013].

Nous ne pouvons donc pas déterminer si l'absence de résultats significatifs concernant les mesures physiologiques est due aux facteurs étudiés, liés au robot, ou à l'environnement des expérimentations. Il serait intéressant de procéder à des tests en environnement réel afin d'approfondir cette réflexion.

Dans nos expérimentations, nous n'avons pas toujours pu mesurer les signaux physiologiques en continu (sauf pour l'expérimentation sur l'apparence des robots) : les mouvements dus aux opérations de montage gênaient la capture des signaux, qui étaient donc recueillis au repos après chaque cycle de test. Une perspective consisterait, avec de nouveaux capteurs, à enregistrer continuellement les signaux physiologiques des opérateurs et de corréler leurs variations à certains événements au cours de l'interaction avec le robot.

De plus, nos méthodes d'analyse et de normalisation des mesures physiologiques restent sommaires. Il est possible que d'autres méthodes puissent faire ressortir d'autres résultats intéressants. Nous n'avons pas non plus interprété les signaux physiologiques à un haut niveau, comme l'ont fait Kulić et Croft [Kulić et Croft, 2007] en estimant l'état affectif des utilisateurs sur l'échelle valence-arousal. Ceci pourrait constituer une autre perspective intéressante, notamment afin d'informer le robot de l'état affectif des opérateurs, de modifier le comportement du robot en conséquence et ainsi d'améliorer l'acceptabilité du système.

8.2.3 L'utilisation de la réalité virtuelle

Les expérimentations se focalisant sur les facteurs liés au robot ont été menées uniquement en environnement virtuel et des résultats intéressants ont pu être montrés. Cependant, une reproduction de ces expérimentations en environnement réel permettrait de confirmer plusieurs points et notamment de déterminer si l'absence de résultats concernant les mesures physiologiques est due aux facteurs étudiés (liés au robot) ou à l'environnement de simulation. Cette réflexion reste une question ouverte pour des travaux futurs.

Les expérimentations sur les facteurs liés à la configuration de collaboration ont été reproduites à la fois en environnements réel et virtuel, ce qui permet de formuler des remarques et d'engager des discussions quant à la comparaison des deux situations.

Ces réflexions tournent notamment autour des biais sensori-moteurs existants en environnement virtuel par rapport aux situations réelles. En effet, en environnement virtuel, les utilisateurs sont immergés à l'aide d'écrans et interagissent avec des objets virtuels de manière pseudo-naturelle. Ils ne perçoivent pas nécessairement les environnements virtuels de la même manière que la situation réelle et y interagissent de manière différente.

Dans la suite, nous considérons deux types de biais qui sont apparus dans nos expérimentations : les biais relatifs aux opérations à effectuer et les biais relatifs au sentiment de présence dans l'environnement virtuel.

8.2.3.1 Biais relatifs aux opérations

Dans nos expérimentations, les opérations virtuelles à effectuer étaient simplifiées par rapport à la situation réelle : le montage des pièces s'effectuait par proximité avec leur emplacement (et éventuellement une orientation définie) et aucun système à retour d'effort n'était utilisé. Les efforts à fournir étaient donc réduits par rapport à la situation réelle. L'absence de retour haptique pouvait également gêner les opérateurs et rendre la tâche plus difficile dans certaines configurations. Au cours des tests, afin que la situation virtuelle corresponde le plus possible à la situation réelle (difficulté des tâches, temps de cycle), la tolérance des opérations virtuelles à effectuer était adaptée au début des tests en fonction des aptitudes de chaque opérateur et modifiée en temps réel si besoin.

Les biais relatifs aux opérations virtuelles ont-ils perturbé nos tests ? La réponse est a priori non. En effet, pour l'étude de l'acceptabilité de la collaboration, les cas d'étude et les opérations que nous avons mis en place servaient à évaluer l'interaction entre un opérateur et un robot et pas

l'efficacité de la collaboration (même si, dans nos cas d'étude, les temps de cycle se rapprochaient toujours des situations d'usine). Nous nous sommes focalisés plutôt sur des notions subjectives de l'acceptabilité, comme l'utilisabilité, l'utilité perçue, l'efficacité perçue ou encore la sécurité perçue. De plus, le fait d'adapter la tolérance des tâches virtuelles à chaque opérateur a permis d'écarter leur attention d'une difficulté possible des opérations à effectuer en environnement virtuel et de la reconcentrer sur l'observation et l'interaction avec le robot.

Cette réflexion est soutenue par les résultats de nos expérimentations. Au cours des tests, les réponses aux questionnaires étaient globalement similaires en environnement réel et en environnement virtuel, notamment pour les composantes utilitaires, ce qui montre un impact réduit des biais relatifs aux opérations. Ceci est également dû au fait que les opérateurs étaient bien sensibilisés sur le besoin d'évaluer l'interaction avec le robot et pas l'interaction en environnement virtuel.

De plus, en situation de collaboration assistée par un robot (pour le montage de raccords d'air), la baisse du rythme cardiaque des opérateurs, observée en environnement réel et montrant un soulagement des efforts fournis, est également apparue en environnement virtuel. Ceci montre que les opérations virtuelles étaient suffisamment fidèles aux opérations réelles et pouvaient faire ressortir l'intérêt de l'assistance du robot, tout du moins pour ce cas d'étude.

Pour d'autres situations d'étude, dans lesquelles des opérations plus minutieuses sont à effectuer et où l'efficacité à un rôle plus important à jouer, il est possible qu'un retour d'effort soit nécessaire en situation virtuelle. En effet, en usine, certaines tâches sont parfois pénibles à réaliser et concernent le montage fin (comme l'orientation particulière de pièces dans une porte de voiture) et le port de charge lourde (tableau de bord, sièges, roues, parties de moteurs). En environnement virtuel, afin d'apprécier l'utilité d'un robot collaboratif pour ce genre de tâches, il est sans doute nécessaire de retranscrire correctement l'ensemble des contraintes liées au poste de montage et seul un système à retour d'effort peut vraisemblablement y parvenir. Cette réflexion pourrait amener à mettre en place un cas d'étude supplémentaire pour évaluer ces impacts.

8.2.3.2 Biais relatifs au sentiment de présence

D'autres biais sont apparus et pouvaient influencer le sentiment de présence des opérateurs dans l'environnement virtuel. L'un de ces biais concerne le champ de vision des utilisateurs. En effet, l'utilisation des systèmes de réalité virtuelle de PSA Peugeot Citroën (CAVE 3 faces et 5 faces) a autorisé une immersion importante des opérateurs dans les environnement virtuels, comparés à la salle immersive de l'école des Mines comportant un seul écran. Cependant, l'utilisation de lunettes stéréoscopiques a probablement réduit le champ de vision des opérateurs, notamment en vision périphérique, les empêchant de déceler ou deviner certains mouvements du robot ou même sa présence à proximité. Ce phénomène est notamment apparu en situation de coprésence, lorsque les opérateurs étaient à côté du robot : certains opérateurs étaient très peu conscients de la présence du robot.

Le manque de conscience de la présence du robot est aussi dû au manque de retour haptique et au manque de retour sonore. Pour la situation de coprésence en environnement virtuel, la proximité avec le robot (15 cm) était signalée par un signal sonore, mais ce signal ne suffisait pas à rendre les opérateurs pleinement conscients de la présence du robot. Aucun contact avec le robot n'était retranscrit (pas de retour haptique) et l'opérateur pouvait entrer en collision avec le robot sans réellement s'en rendre compte et sans danger. De plus, en situation de coprésence ou de collaboration, le bruit des moteurs du robot constitue généralement un indice de son fonctionnement et de sa présence, ce qui peut éventuellement influencer le ressenti des opérateurs et l'acceptabilité. L'ajout de son dans nos simulations pourrait constituer une perspective de nos

études.

L'existence de ces biais supplémentaires (visuel, haptique, sonore) a-t-elle perturbé nos tests ? La réponse est en partie oui. Ces biais ont engendré un manque d'immersion et de présence dans l'environnement virtuel, ce qui a en partie joué sur les composantes hédonistes de l'acceptabilité : la sécurité perçue et le sentiment de relaxation. Les opérateurs se sentaient moins stressés en environnement virtuel. Ceci peut expliquer pourquoi la conductance de la peau, généralement associée au niveau de stress, a très peu varié en environnement virtuel, alors que des différences significatives sont apparues en environnement réel.

L'ensemble de ces réflexions sur les biais liés aux environnements virtuels est également relatif aux avancées technologiques actuelles. Les expérimentations que nous avons menées en environnement virtuel n'auraient pas été les mêmes il y a 15 ans (latence, résolution d'écran). Même si des biais sensori-moteurs persistent encore à l'heure actuelle, l'avancée des technologies a permis de les réduire petit-à-petit. A l'avenir, les avancées futures permettront peut-être non pas d'éliminer complètement ces biais, mais de réduire leur impact sur les prochaines expérimentations menées en environnement virtuel.

8.2.4 Synthèse

Les questionnaires représentent les mesures les plus directes des composantes de l'acceptabilité. Ils ont permis de tirer des résultats intéressants d'abord sur des composantes utilitaires de l'acceptabilité : l'utilisabilité (contraintes imposées), l'utilité perçue du robot ou encore l'efficacité perçue de l'opérateur. Les questionnaires ont également permis de cibler des composantes hédonistes, comme le sentiment de satisfaction ou l'impression de sécurité.

Les mesures physiologiques ont permis de compléter ces résultats. La conductance de la peau, liée au niveau de stress des opérateurs, a notamment permis de cibler les composantes hédonistes de l'acceptabilité : la sécurité perçue, le sentiment de relaxation. Le rythme cardiaque a également pu mettre en valeur les efforts soulagés grâce à l'assistance d'un robot.

Enfin, les biais relatifs aux environnements virtuels n'ont pas tous impacté les expérimentations. Les résultats des questionnaires étaient similaires en situations réelle et virtuelle, surtout en ce qui concerne les composantes utilitaires de l'acceptabilité : utilisabilité, utilité perçue, efficacité perçue. Les tendances au niveau du rythme cardiaque ont également été retrouvées en environnement réel et en environnement virtuel. En revanche, les environnements virtuels ont moins bien permis de rendre compte de l'influence de certains facteurs sur les composantes hédonistes de l'acceptabilité. Certains biais, liés au sentiment de présence en environnement virtuel, ont poussé les opérateurs à se sentir plus en sécurité et plus relaxés en environnement virtuel, d'où probablement une absence de résultats significatifs concernant la conductance de la peau.

L'utilisation de la réalité virtuelle a ainsi été pertinente dans notre cas d'étude : les résultats liés aux composantes utilitaires de l'acceptabilité en environnement virtuel ont été bien représentatifs de la situation réelle et ce sont ces composantes auxquelles les opérateurs semblent avoir accordé le plus d'importance. En revanche, si l'étude de l'acceptabilité se focalise plutôt sur des composantes hédonistes, il peut être nécessaire de mener des tests en environnement réel afin de recueillir les véritables réactions des utilisateurs.

La Figure 8.8 récapitule les apports et les biais de notre méthodologie concernant l'étude de l'acceptabilité, en reprenant les conclusions de la première problématique (Section 8.1).

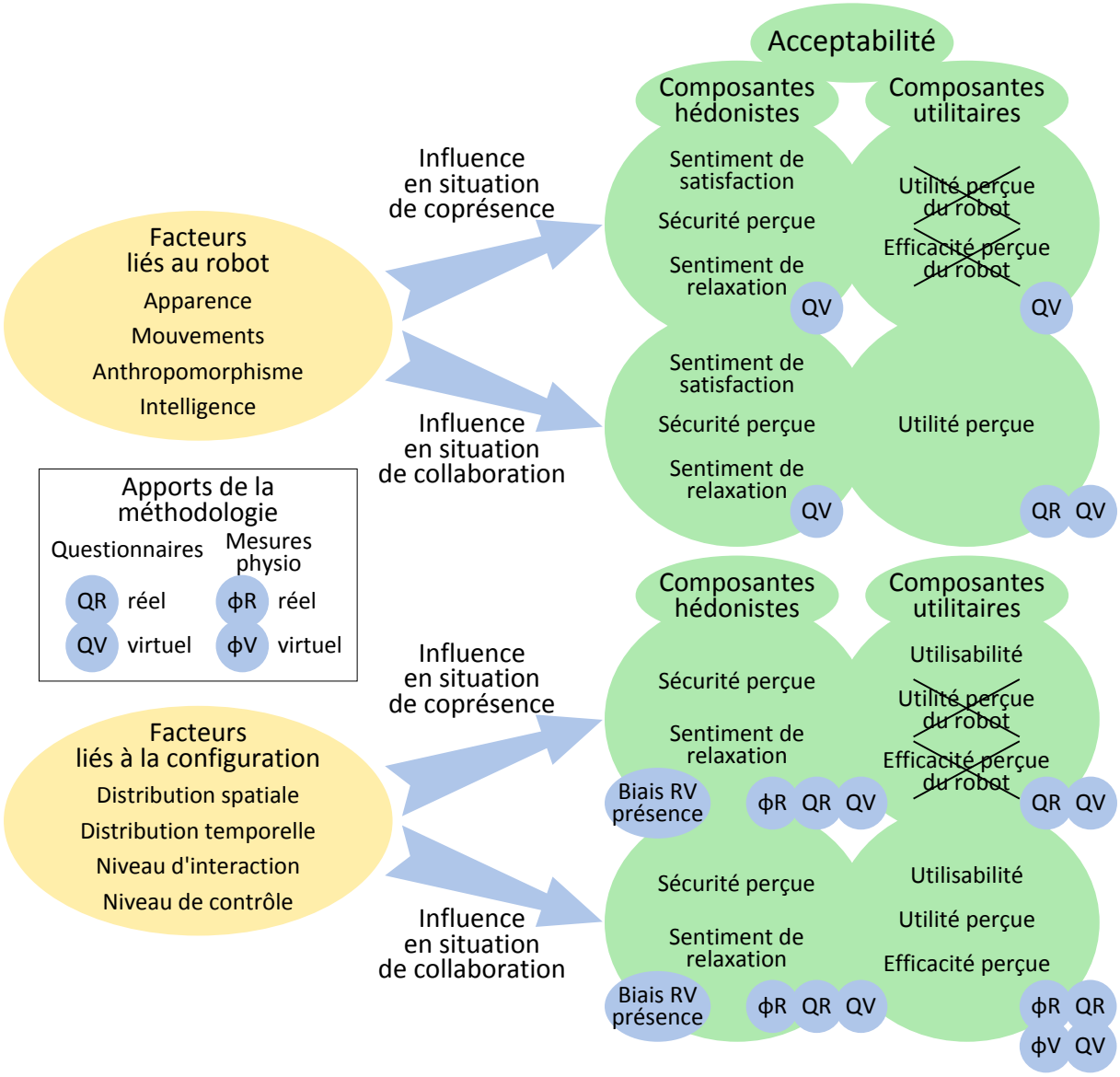


FIGURE 8.8 – Les apports et les biais de notre méthodologie dans l'étude de l'acceptabilité

8.3 Discussions, limites et perspectives

8.3.1 Limites de notre étude

Les résultats issus de nos expérimentations ont permis d'esquisser des réponses aux problématiques de la thèse. Cependant, nos expérimentations n'ont traité qu'une partie de l'étude de l'acceptabilité et des perspectives restent envisageables : elles sont représentées sur la Figure 8.9.

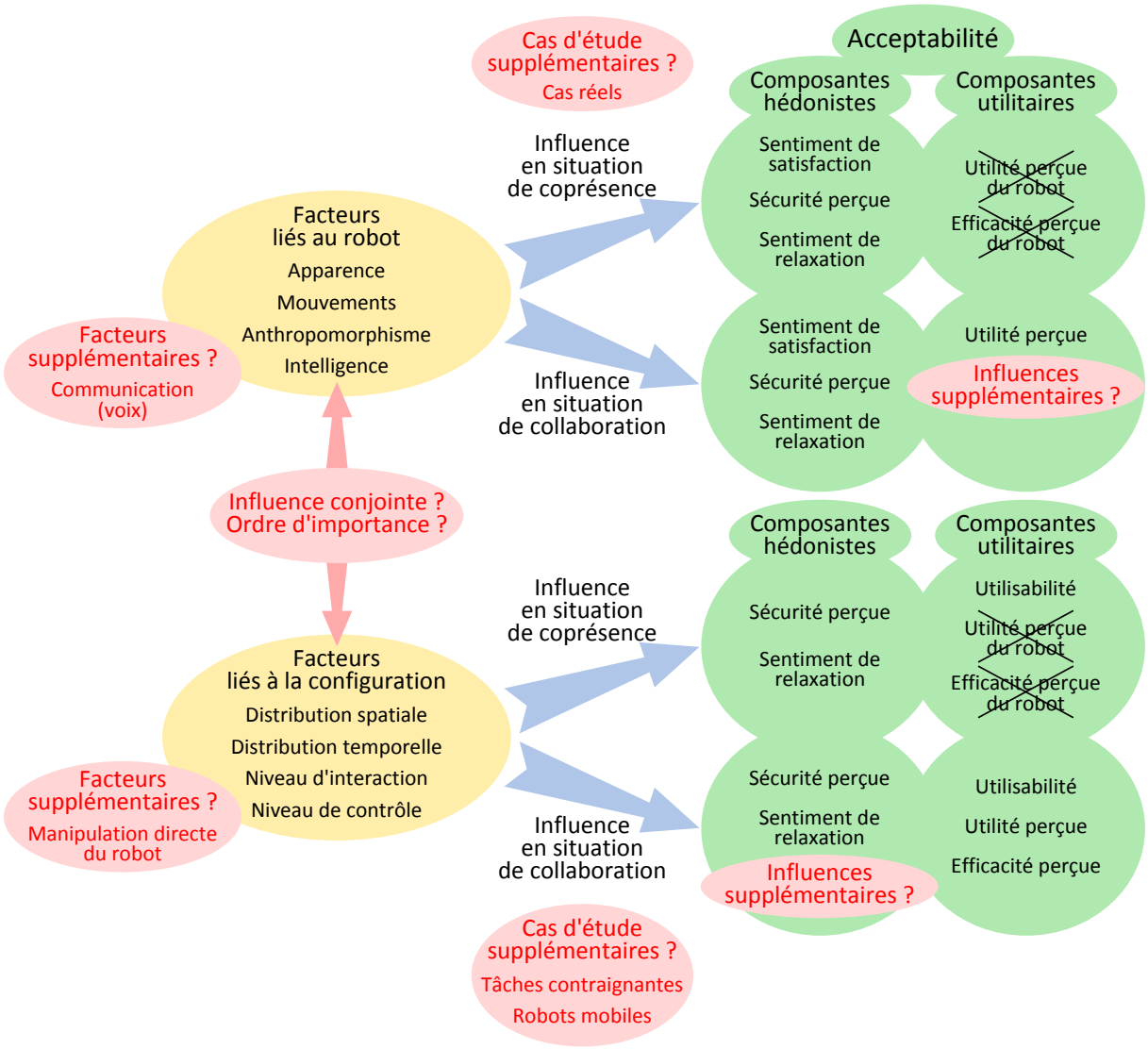


FIGURE 8.9 – Les perspectives possibles (en rouge) à envisager pour la suite de nos travaux

Afin de compléter notre étude, une première perspective consisterait à étoffer notre panel de facteurs pouvant influencer les composantes de l'acceptabilité. Certains de ces facteurs supplémentaires correspondent uniquement à des variations de facteurs déjà étudiés : des mouvements supplémentaires faisant intervenir la variabilité du mouvement humain (gestes parasites), des apparences supplémentaires utilisant des têtes anthropomorphes (à la manière du robot Baxter) ou encore un mode de contrôle du robot faisant intervenir une manipulation directe du bras robotisé (pour apprendre au robot ou pour repositionner certaines pièces de manière adéquate).

Un facteur nouveau, lié au robot et non étudié dans nos expérimentations, concernerait la capacité du robot à communiquer avec l'opérateur (à l'aide d'un système de synthèse vocale). Un robot discutant avec l'opérateur et lui indiquant l'évolution de ses opérations pourrait influencer l'acceptabilité de travailler avec lui.

Il serait également intéressant de mettre en place des cas d'étude supplémentaires. Pour les facteurs liés au robot, des cas d'étude en environnement réel permettraient de déterminer si les résultats que nous avons obtenus étaient dus aux facteurs étudiés ou plutôt à l'environnement de simulation. Ceci permettrait également de justifier ou non la pertinence d'utiliser des mesures physiologiques en environnement virtuel pour ces situations particulières. Pour les facteurs liés à la configuration de collaboration, les deux cas d'étude analysés (situation de coprésence et situation de collaboration) résument déjà bien les différentes situations que l'on peut trouver en usine. Un cas d'étude supplémentaire consisterait à effectuer des tâches plus contraignantes pour les opérateurs (port de charge lourde) et pour lesquelles la collaboration homme-robot serait plus utile. Un autre cas d'étude pourrait également se focaliser sur des robots mobiles en usine qui approvisionneraient les opérateurs en pièces : la façon dont ils se déplacent auprès des opérateurs pourrait influencer l'acceptabilité.

Une limite supplémentaire de notre étude vient du fait que certaines expérimentations n'ont pas traité toutes les composantes de l'acceptabilité. Notamment pour les expérimentations mettant en jeu des facteurs liés au robot, les composantes utilitaires ont été mises légèrement de côté (pas de questions concrètes dans les questionnaires). Ce choix avait été fait car les tâches demandées aux utilisateurs étaient relativement simples. Une des perspectives de nos expérimentations serait alors d'étudier l'influence de certains facteurs sur des composantes supplémentaires de l'acceptabilité.

Enfin, les expérimentations que nous avons menées n'ont pas évalué l'influence conjointe des facteurs liés au robot et des facteurs liés à la configuration de collaboration. Pour certains cas d'étude, comme le montage de porte ou le montage de raccords d'air, il aurait par exemple été intéressant de comparer différentes apparences de robots en plus de différentes distributions spatio-temporelles. L'apparence du robot pourrait influencer la distance perçue comme sécurisante ou encore l'appréhension à interagir physiquement avec lui. Cette perspective permettrait également d'élaborer une analyse générale sur les degrés d'importance de chaque facteur les uns par rapport aux autres et notamment de déterminer si les opérateurs sont sensibles à des facteurs liés à la configuration de collaboration plutôt qu'à des facteurs liés au robot.

Pour terminer, notre méthodologie n'a été utilisée que pour des études à court terme. Pendant nos tests, les opérateurs découvraient le système de collaboration pour la première fois : les impressions étaient recueillies après seulement une première utilisation du système. Il est probable que des notions d'apprentissage et d'habitude soient à prendre en compte dans l'évaluation de l'acceptabilité : ceci pourrait constituer une perspective de notre approche, en effectuant des études à plus long terme et en faisant revenir les mêmes opérateurs pour évaluer l'évolution de leurs impressions.

8.3.2 Discussion sur les facteurs d'acceptabilité

L'ensemble des perspectives de nos travaux amène plusieurs discussions dont l'une concerne l'importance relative des facteurs liés au robot et des facteurs liés à la configuration de collaboration.

Les facteurs liés au robot sont beaucoup étudiés en robotique de service : apparences anthropomorphes, mouvements biologiques, niveau d'intelligence. Cependant, sur des postes concrets d'usine, les opérateurs sont généralement focalisés sur les tâches qu'ils ont à effectuer. En situa-

tion de collaboration avec un robot, il est alors probable que les opérateurs ne prêtent pas grande attention aux caractéristiques liées aux robots, comme leur apparence ou leurs mouvements. Il est possible que d'autres facteurs aient une influence plus importante sur l'acceptabilité.

Les facteurs liés à la configuration de collaboration se concentrent sur des caractéristiques plus globales du travail entre le robot et l'opérateur : distribution spatiale, distribution temporelle. La place et l'importance du robot semblent cependant s'atténuer vis-à-vis de ces considérations plus globales. Une question pertinente consiste à se demander si l'on étudie toujours la collaboration entre un homme et un robot ou plutôt une configuration de travail particulière.

Cette réflexion s'est notamment fait ressentir au cours de l'expérimentation sur le montage de porte en situation de coprésence avec un robot. Les différences significatives dans les questions liées à l'utilisabilité étaient globalement dues aux contraintes imposées par la position fixe du robot et son manque d'adaptation aux avancées ou aux retards de l'opérateur. Certains opérateurs, à l'issue des tests, ont clairement déclaré que le problème lié à la configuration proche du robot n'était pas nécessairement dû à une appréhension vis-à-vis du robot lui-même, mais à sa position fixe et à la nécessité d'effectuer les opérations avant lui. Afin d'étudier ce phénomène plus en détail, il aurait été intéressant de rajouter une condition supplémentaire dans laquelle l'opérateur travaille sans robot, ou alors en remplaçant le robot par un deuxième opérateur.

Cette réflexion pourrait également amener à la mise en place de nouveaux cas d'étude permettant d'évaluer l'influence conjointe de facteurs liés au robot et de facteurs liés à la configuration de collaboration. Par exemple, l'étude de l'influence conjointe de l'apparence des robots et de leur distance à l'utilisateur lors d'une tâche de collaboration pourrait représenter une perspective intéressante. Ces études supplémentaires permettraient de déterminer si, oui ou non, les facteurs liés à la configuration de collaboration ont un impact plus fort sur l'acceptabilité que les facteurs liés au robot, tout du moins en environnement industriel.

8.3.3 Utilisation de notre méthodologie en milieu industriel

Dans le domaine de la collaboration homme-robot en milieu industriel, l'apport de notre méthodologie d'évaluation de l'acceptabilité est double. D'une part, nous avons pu déterminer quelles étaient les composantes importantes de l'acceptabilité aux yeux des opérateurs, essentiellement l'utilisabilité, la sécurité perçue, l'utilité perçue et l'efficacité perçue, et nous avons étudié comment ces composantes étaient influencées dans différentes situations de coprésence et de collaboration. D'autre part, nous avons déterminé qu'une méthodologie utilisant la réalité virtuelle, des questionnaires et des mesures physiologiques était globalement pertinente dans cette évaluation, même si certains biais devaient être pris en compte.

Au regard de ces conclusions, notre méthodologie pourrait ainsi servir à traiter de futurs cas d'étude de collaboration homme-robot et d'évaluation de l'acceptabilité. Il convient néanmoins de bien être conscient du cadre d'utilisation de cette méthodologie, de savoir comment l'utiliser et de savoir comment en analyser les résultats.

Tout d'abord, il faut être conscient que notre méthodologie d'évaluation se place dans une approche a priori de l'acceptabilité d'un futur système, avant son intégration potentielle en usine : il ne s'agit pas d'étudier un poste déjà présent en usine. Aussi, notre méthodologie traite essentiellement de composantes utilitaires et hédonistes de l'acceptabilité, mais elle ne s'applique pas à évaluer des composantes d'ordre social ou éthique.

Pour l'étude de futurs cas de collaboration homme-robot, il convient dans un premier temps de reprendre les schémas de la Section 8.1 : il s'agit de cibler d'une part les facteurs qui peuvent avoir une influence sur l'acceptabilité, qu'ils soient liés au robot ou à la configuration de collaboration, et d'autre part les composantes de l'acceptabilité que l'on cherche à évaluer, qu'elles

soient utilitaires ou hédonistes. Les conclusions apportées dans ce manuscrit peuvent déjà donner un aperçu des différentes influences auxquelles on peut s'attendre. Les futurs cas d'étude mis en place pourront éventuellement compléter ces résultats.

Dans un second temps, il s'agit de mettre en place un protocole d'expérimentation mettant en place différentes conditions, qui correspondent à différentes variations des facteurs pouvant influencer l'acceptabilité. Le protocole d'expérimentation doit aussi prévoir l'utilisation de questionnaires, spécialement rédigés pour cibler les composantes de l'acceptabilité que l'on souhaite évaluer. Des mesures physiologiques peuvent être utilisées pour recueillir des informations supplémentaires, comme l'intensité physique de la collaboration ou le niveau de stress ressenti, difficilement retranscrites par les questionnaires.

Les futures expérimentations de collaboration homme-robot pourront se contenter d'être menées en environnement virtuel si les expérimentateurs sont bien conscients des biais qui peuvent survenir. Concernant les composantes utilitaires de l'acceptabilité (utilisabilité, utilité perçue, efficacité perçue), les résultats issus des environnements virtuels seront suffisants et rendront bien compte d'une situation réelle, tant que les cas étudiés ne mettront pas en œuvre des opérations trop contraignantes, comme des opérations minutieuses ou le port de charge lourde. Concernant les composantes hédonistes de l'acceptabilité, les expérimentateurs de ces futurs cas d'étude devront être conscients que la sécurité et la relaxation perçues par les utilisateurs en environnement virtuel risquent d'être biaisées par rapport à la situation réelle. C'est pour ces études en particulier que des tests en environnement réel pourront être nécessaires.

8.3.4 Perspectives sur la robotique de service

Nos expérimentations se sont focalisées principalement sur des cas d'étude inspirés du domaine industriel. Cependant, la collaboration homme-robot a également vocation à se développer de plus en plus dans le domaine de la robotique de service. Il convient alors de déterminer dans quel cadre nos conclusions peuvent s'appliquer ou non à ce domaine.

Les cas d'étude que nous avons mis en place rendent bien compte de la majorité des situations que l'on peut trouver en usine, avec des situations de coprésence (homme et robot côte à côte) et des situations de collaboration (homme et robot face à face). Ces types de situations se retrouvent très bien dans la robotique de service. Dans un futur proche, certaines tâches de la vie quotidienne pourront être réalisées en coprésence avec un robot, telles que la préparation d'un repas dans une cuisine, et les hommes et les robots devront apprendre à se partager l'espace physique. D'autres tâches requerront une interaction plus forte entre des hommes et des robots, comme le déplacement de meubles ou l'assemblage d'un puzzle, et ils devront apprendre à coordonner leurs tâches dans le temps. La robotique de service fait également intervenir des situations d'assistance aux personnes mais elles ne correspondent pas véritablement à des situations de coprésence ou de collaboration, ou alors essentiellement de manière sporadique. Nous ne considérons pas ces situations d'assistance dans la suite.

Globalement, la distinction entre situations de coprésence et de collaboration semble donc bien s'étendre au domaine de la robotique de service et c'est dans ce cadre que certaines de nos conclusions peuvent s'y appliquer. Cependant, les aspects étudiés par la robotique industrielle et la robotique de service sont généralement différents. Dans notre étude, nos expérimentations ont été menées auprès d'opérateurs et ce type de population accordait beaucoup d'importance aux composantes utilitaires de l'acceptabilité : l'utilisabilité, l'utilité perçue, l'efficacité perçue. Dans le domaine de la robotique de service, les personnes concernées sont différentes (des personnes à leur domicile par exemple) et peuvent être plus sensibles à des composantes hédonistes de l'acceptabilité : le sentiment de satisfaction, la sécurité perçue, l'attrait du système.

De plus, les types de robots utilisés dans la robotique industrielle et la robotique de service sont différents. Les robots que nous avons étudiés dans nos expérimentations sont tous des robots industriels de type bras articulé. Dans la robotique de service, l'ensemble des robots existant est plus varié et intègre des fonctionnalités supplémentaires, comme des personnalités propres ou la possibilité de communiquer avec les personnes. L'accent est souvent mis sur le caractère social de l'interaction. C'est un aspect que nous n'avons pas considéré dans nos expérimentations.

Il apparaît donc que les composantes et les facteurs d'acceptabilité étudiés dans la robotique de service sont différents de ceux du domaine industriel. Cependant, la distinction entre situations de coprésence et de collaboration peut très bien s'appliquer au domaine de la robotique de service. Le schéma présenté en Section 8.1 pourrait ainsi être utilisé comme modèle pour étudier les différentes composantes et les différents facteurs de l'acceptabilité de la robotique de service et ainsi compléter nos conclusions relatives au domaine industriel.

8.3.5 Considération finale

L'ensemble de ces perspectives montre que les recherches à mener sur l'acceptabilité de la collaboration homme-robot, notamment en milieu industriel, restent vastes. Nous espérons avoir apporté des résultats intéressants à cette étude et montré l'intérêt de notre méthodologie dans ces recherches, tout en ouvrant la voie à des pistes de réflexion. Nous sommes certains que la réalité virtuelle pourra continuer d'apporter des conclusions intéressantes dans l'étude de l'acceptabilité de la collaboration homme-robot. Les personnes menant ces futures recherches devront être conscientes des avantages ainsi que des limites liés à l'utilisation de la réalité virtuelle. Nous espérons que notre travail aura permis de présenter l'intérêt et la nécessité, dans le domaine de la collaboration homme-robot comme dans d'autres domaines, de mener des comparaisons entre environnements réels et virtuels.

Contributions scientifiques

Journaux

(Acceptation sous réserve de modifications)

Hugues, O., Weistroffer, V., Paljic, A., Fuchs, P., Gaudin, T., Abdul Karim, A. et Buendia, A. (2014). Determining the important subjective criteria in the perception of human-like robot movements using virtual reality. *International Journal of Humanoid Robotics.*

Conférences

Weistroffer, V., Paljic, A., Fuchs, P., Hugues, O., Chodacki, J.-P., Ligot, P. et Morais, A. (2014). Assessing the acceptability of human-robot co-presence on assembly lines : A comparison between actual situations and their virtual reality counterparts. *In Proceedings of the 23rd IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN)*, Edinburgh, Scotland, 25-29 octobre 2014. **Best Paper Finalist**

Weistroffer, V., Paljic, A., Callebert, L. et Fuchs, P. (2013). A methodology to assess the acceptability of human-robot collaboration using virtual reality. *In Proceedings of the 19th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST)*, pages 39–48, Singapore, 6-8 octobre 2013.

Séminaires et salons

Weistroffer, V., Paljic, A., Callebert, L. et Fuchs, P. (2013). Une méthodologie pour évaluer l'acceptabilité de la collaboration homme-robot en utilisant la réalité virtuelle. *8èmes journées de l'Association Française de Réalité Virtuelle, Augmentée, Mixte et d'Interaction 3D*, Laval, France, 28-30 octobre 2013.

Weistroffer, V., Paljic, A. et Fuchs, P. (2013 et 2014). Etude des conditions d'acceptabilité de la collaboration homme-robot en utilisant la réalité virtuelle. Poster au salon *Innovative Solutions for Manufacturing* (PSA Peugeot Citroën, Vélizy, 30 avril 2014) et au salon *StelLab - Science by PSA* (PSA Peugeot Citroën, Vélizy, 15 novembre 2013).

Contributions industrielles

Valorisation d'une méthodologie utilisant la réalité virtuelle pour évaluer l'acceptabilité de systèmes de collaboration homme-robot. Passage de jalons industriels.

- Jalon JOS (TRL 2) : Ouverture Scientifique. Phase de découverte et d'exploration des activités scientifiques (10 juillet 2013) ;

– Jalon JOT (TRL 3) : Ouverture Travaux et Validation Orientation Technologique. Phase de validation du concept (20 novembre 2014).

Vidéos

Vidéo de présentation de l'article publié à la conférence VRST 2013. http://youtu.be/GxANpatuciM. MINES ParisTech, juillet 2013.

Vidéo de présentation des recherches de la chaire « PSA Peugeot Citroën - Robotique et Réalité Virtuelle ». https://www.youtube.com/watch?v=bnP7WhM4TTs. MINES ParisTech, juillet 2014 (Thibaud Vaerman et Stéphane Boda).

Bibliographie

Adorno, B. V. (2011). *Two-arm Manipulation : From Manipulators to Enhanced Human-Robot Collaboration.* Thèse de doctorat, Université Montpellier II.

Akella, P., Peshkin, M., Colgate, E., Wannasuphoprasit, W., Nagesh, N., Wells, J., Holland, S., Pearson, T. et Peacock, B. (1999). Cobots for the automobile assembly line. *In Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, volume 1, pages 728–733.

Albu-Schäffer, A., Haddadin, S., Ott, C., Stemmer, A., Wimböck, T. et Hirzinger, G. (2007). The DLR Lightweight Robot - Design and control concepts for robots in human environments. *Industrial Robot Journal*, 34(5):376–385.

Arkin, R. C. (2008). On the ethical quandaries of a practicing roboticist : A first-hand look. *In Proceedings of the 2008 conference on Current Issues in Computing and Philosophy*, pages 45–49, Amsterdam, The Netherlands. IOS Press.

Asaro, P. (2007). Robots and responsibility from a legal perspective. *In Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA).*

Barattini, P., Morand, C., Almajai, I., Robertson, N., Hopgood, J., Ferrara, P., Bonasso, M., Strassmair, C., Rottenbacher, M., Staehr, M., Neumann, R., Tornari, M., Rovetta, A., Plasch, M., Bauer, H., Capco, J., Woegerer, C. et Pichler, A. (2013). Towards tailor made robot co workers based on a plug & produce framework. *In Proceedings of the 2013 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM)*, pages 91–96.

Bartneck, C., Croft, E. et Kulić, D. (2009). Measurement instruments for the anthropomorphism, animacy, likeability, perceived intelligence, and perceived safety of robots. *International Journal of Social Robotics*, 1(1):71–81.

Bauer, A., Wollherr, D. et Buss, M. (2008). Human-robot collaboration : A survey. *International Journal of Humanoid Robotics*, 5(1):47–66.

Beer, J. M., Prakash, A., Mitzner, T. L. et Rogers, W. A. (2011). Understanding robot acceptance. Rapport technique, Georgia Institute of Technology. Human Factors and Aging Laboratory.

Bobillier-Chaumon, M. et Dubois, M. (2009). L'adoption des technologies en situation professionnelle : quelles articulations possibles entre acceptabilité et acceptation ? *Le travail humain*, 72:355–382.

Bouletreau, A., Chouanière, D., Wild, P. et Fontana, J.-M. (1999). Concevoir, traduire et valider un questionnaire. A propos d'un exemple, EUROQUEST. *In Les notes scientifiques et techniques de l'INRS*, numéro 178. INRS.

Broadbent, E., Lee, Y. I., Stafford, R. Q., Kuo, I. H. et MacDonald, B. A. (2011). Mental schemas of robots as more human-like are associated with higher blood pressure and negative emotions in a human-robot interaction. *International Journal of Social Robotics*, 3(3):291–297.

Burgard, W., Cremers, A. B., Fox, D., Hähnel, D., Lakemeyer, G., Schulz, D., Steiner, W. et Thrun, S. (1999). Experiences with an interactive museum tour-guide robot. *Artificial Intelligence*, 114(1-2):3–55.

Buss, S. R. (2004). Introduction to inverse kinematics with jacobian transpose, pseudoinverse and damped least squares methods. Typeset manuscript.

Buss, S. R. et Kim, J.-S. (2005). Selectively damped least squares for inverse kinematics. *Journal of Graphics Tools*, 10:37–49.

Canning, C. et Scheutz, M. (2013). Functional near-infrared spectroscopy in human-robot interaction. *Journal of Human-Robot Interaction*, 2:62–84.

Chaminade, T., Franklin, D., Oztop, E. et Cheng, G. (2005). Motor interference between humans and humanoid robots : Effect of biological and artificial motion. *In Proceedings of the 4th International Conference on Development and Learning*, pages 96–101.

Chaminade, T., Zecca, M., Blakemore, S., Takanishi, A., Frith, C. D., Micera, S., Dario, P., Rizzolatti, G., Gallese, V. et Umilta, M. A. (2010). Brain response to a humanoid robot in areas implicated in the perception of human emotional gestures. *Plos One*, 5:1–12.

Chellali, M.-E.-A. (2009). *Etude des interactions homme-homme pour l'élaboration du référentiel commun dans les environnements virtuels collaboratifs.* Thèse de doctorat, Université de Nantes.

Clodic, A., Montreuil, V., Alami, R. et Chatila, R. (2005). A decisional framework for autonomous robots interacting with humans. *In Proceedings of the 2005 IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN)*, pages 543–548.

Colgate, J. E., Peshkin, M. et Klostermeyer, S. H. (2003). Intelligent Assist Devices in industrial applications : a review. *In Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, volume 3, pages 2516–2521.

Colgate, J. E., Wannasuphoprasit, W. et Peshkin, M. A. (1996). Cobots : Robots for collaboration with human operators. *In Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division.*

Coradeschi, S., Cesta, A., Cortellessa, G., Coraci, L., Gonzalez, J., Karlsson, L., Furfari, F., Loutfi, A., Orlandini, A., Palumbo, F., Pecora, F., von Rump, S., Stimec, A., Ullberg, J. et Otslund, B. (2013). GiraffPlus : Combining social interaction and long term monitoring for promoting independent living. *In Proceedings of the 6th International Conference on Human System Interaction (HSI)*, pages 578–585.

Coupeté, E., Manitsaris, S. et Moutarde, F. (2014). Real-time recognition of human gestures for collaborative robots on assembly-line. *In Proceedings of the 3rd International Symposium on Human Digital Modeling (DHM).*

Crandall, J. W. et Goodrich, M. A. (2001). Experiments in adjustable autonomy. *In IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics.*

Dautenhahn, K. et Werry, I. (2002). A quantitative technique for analysing robot-human interactions. *In Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, volume 2, pages 1132–1138.

David, A.-S. (2012). Cobotique - Au service de la réindustrialisation et du Made in France. *Le Nouvel Economiste*, 1603:65–66.

Davis, F. D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *Management Information Systems Quarterly*, 13(3):319–340.

Dawson, M. E., Schell, A. M. et Filion, D. L. (2000). *Handbook of Psychophysiology*, chapitre 8, pages 200–223. Cambridge University Press.

de Graaf, M. M. et Ben Allouch, S. (2013). Exploring influencing variables for the acceptance of social robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 61(12):1476–1486.

De Santis, A., Di Gironimo, G., Marzano, A., Siciliano, B. et Tarallo, A. (2008). A virtual-reality-based evaluation environment for wheelchair-mounted manipulators. *Eurographics Italian Chapter Conference*, 1:1–8.

Decker, M. (2007). Can humans be replaced by autonomous robots ? Ethical reflections in the framework of an interdisciplinary technology assessment. *In Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA).*

DiSalvo, C. F., Gemperle, F., Forlizzi, J. et Kiesler, S. (2002). All robots are not created equal : The design and perception of humanoid robot heads. *In Proceedings of the Conference on Designing Interactive Systems.*

Dorais, G. A., Bonasso, R. P., Kortenkamp, D., Pell, B. et Schreckenghost, D. (1999). Adjustable autonomy for human-centered autonomous systems.

Duffy, B. R. (2003). Anthropomorphism and the social robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 42:177–190.

Eder, K., Harper, C. et Leonards, U. (2014). Towards the safety of human-in-the-loop robotics : Challenges and opportunities for safety assurance of robotic co-workers. *In Proceedings of the 23rd International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN).*

Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47(6):381–391.

Fitzgerald, C. (2013). Developing Baxter. *In Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA)*, pages 1–6.

Flash, T. et Hogan, N. (1985). The coordination of arm movements : An experimentally confirmed mathematical model. *The Journal of Neuroscience*, 5:1688–1703.

Fong, T. W. (2001). *Collaborative Control : A Robot-Centric Model for Vehicle Teleoperation.* Thèse de doctorat, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA.

Fong, T. W., Nourbakhsh, I. et Dautenhahn, K. (2003). A survey of socially interactive robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 1:143–166.

Fong, T. W., Thorpe, C. et Baur, C. (2002). Collaboration, dialogue, and human-robot interaction. *In 10th International Symposium of Robotics Research (ISRR).* Springer-Verlag.

Friedman, B., Kahn, Jr., P. H. et Hagman, J. (2003). Hardware companions ? : What online AIBO discussion forums reveal about the human-robotic relationship. *In Proceedings of the 2003 SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 273–280.

Fuchs, P., Moreau, G., Arnaldi, B. et Guitton, P. (2006a). *Le traité de la réalité virtuelle - Volume 4 : Les applications de la réalité virtuelle.* Presses des Mines.

Fuchs, P., Moreau, G., Berthoz, A. et Vercher, J.-L. (2006b). *Le traité de la réalité virtuelle - Volume 1 : L'homme et l'environnement virtuel.* Presses des Mines.

Fuchs, P., Moreau, G., Burkhardt, J.-M. et Coquillart, S. (2006c). *Le traité de la réalité virtuelle - Volume 2 : L'interfaçage, l'immersion et l'interaction en environnement virtuel.* Presses des Mines.

Gecks, T. et Henrich, D. (2004). SIMERO : Camera supervised workspace for service robots. *In 2nd Workshop on Advances in Service Robotics.*

Gibet, S., Kamp, J.-F. et Poirier, F. (2004). *Gesture Analysis : Invariant Laws in Movement*, pages 1–9. Springer Berlin Heidelberg.

Glassmire, J., O'Malley, M., Bluethmann, W. et Ambrose, R. (2004). Cooperative manipulation between humans and teleoperated agents. *In Proceedings of the 12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS)*, pages 114–120.

Gleeson, B., MacLean, K., Haddadi, A., Croft, E. et Alcazar, J. (2013). Gestures for industry : Intuitive human-robot communication from human observation. *In Proceedings of the 8th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pages 349–356.

Gleicher, M. (1998). Retargeting motion to new characters. *In Proceedings of ACM SIGGRAPH 98*, pages 33–42.

Goetz, J., Kiesler, S. et Powers, A. (2003). Matching robot appearance and behavior to tasks to improve human-robot cooperation. *In Proceedings of the 12th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN)*, pages 55–60.

Green, S., Billinghurst, M., Chen, X. et Chase, G. (2007). Human-Robot Collaboration : A Literature Review and Augmented Reality Approach in Design. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 1:1–18.

Grüninger, R., Kuś, E. et Hüppi, R. (2009). Market study on adaptive robots for flexible manufacturing systems. *In Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*, pages 1–7.

Haddadin, S., Albu-Schäffer, A. et Hirzinger, G. (2007). Safety evaluation of physical human-robot interaction via crash-testing. *In Robotics : Science and Systems Conference (RSS)*, pages 217–224.

Haddadin, S., Parusel, S., Belder, R., Albu-Schäffer, A. et Hirzinger, G. (2011). Safe acting and manipulation in human environments : A key concept for robots in our society. *In IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO)*, pages 72–75.

Haddadin, S., Suppa, M., Fuchs, S., Bodenmüller, T., Albu-Schäffer, A. et Hirzinger, G. (2009). Towards the robotic co-worker. *In International Symposium on Robotics Research (ISRR)*, volume 1, pages 261–282.

Hägele, M., Schaaf, W. et Helms, E. (2002). Robot assistants at manual workplaces : Effective co-operation and safety aspects. *In Proceedings of the 33rd International Symposium on Robotics.*

Hanson, D. (2006). Exploring the aesthetic range for humanoid robots. *In Proceedings of the ICCS/CogSci-2006 Symposium : Toward Social Mechanisms of Android Science.*

Harris, C. M. et Wolpert, D. M. (1998). Signal-dependent noise determines motor planning. *Nature*, 394:780–784.

Helms, E., Schraft, R. et Hägele, M. (2002). rob@work : Robot assistant in industrial environments. *In Proceedings of the 11th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN)*, pages 399–404.

Hinds, P. J., Roberts, T. L. et Jones, H. (2004). Whose job is it anyway ? A study of human-robot interaction in a collaborative task. *Human-Computer Interaction*, 19(1):151–181.

Hirata, Y. et Kosuge, K. (2000). Distributed robot helpers handling a single object in cooperation with a human. *In Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, volume 1, pages 458–463.

Hoc, J.-M. (2001). Towards a cognitive approach to human-machine cooperation in dynamic situations. *International Journal of Human-Computer Studies*, 54(4):509–540.

Huber, M., Lenz, C., Wendt, C., Farber, B., Knoll, A. et Glasauer, S. (2013). Increasing efficiency in robot-supported assemblies through predictive mechanisms : An experimental evaluation. *In Proceedings of the IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN)*, pages 503–508.

Huber, M., Rickert, M., Knoll, A., Brandt, T. et Glasauer, S. (2008). Human-robot interaction in handing-over tasks. *In Proceedings of the 17th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN)*, pages 107–112.

IFR (2011). *World Robotics 2011.* IFR Statistical Department.

Inoue, K. et Arai, T. (2008). Psychological evaluation for rough shape and biped walking of humanoid robots using virtual reality. *Service Robots Applications*, 1:255–270.

Inoue, K., Nonaka, S., Ujiie, Y., Takubo, T. et Arai, T. (2005). Comparison of human psychology for real and virtual mobile manipulators. *In Proceedings of the 2005 IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN)*, pages 73–78.

Iossifidis, I., Bruckhoff, C., Theis, C., Grote, C., Faubel, C. et Schoner, G. (2002). CORA : An anthropomorphic robot assistant for human environment. *In Proceedings of the 11th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN)*, pages 392–398.

Johansson, G. (1973). Visual perception of biological motion and a model for its analysis. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 14:201–211.

Kanda, T., Ishiguro, H., Imai, M. et Ono, T. (2004). Development and evaluation of interactive humanoid robots. *Proceedings of the IEEE*, 92(11):1839–1850.

Kanda, T., Miyashita, T., Osada, T., Haikawa, Y. et Ishiguro, H. (2008). Analysis of humanoid appearances in human-robot interaction. *IEEE Transactions on Robotics*, 24(3): 725–735.

Kaplan, F. (2004). Who is afraid of the humanoid ? Investigating cultural differences in the acceptance of robots. *International Journal of Humanoid Robotics*, 1(3):465–480.

Karwowski, W. et Rahimi, M. (1991). Worker selection of safe speed and idle condition in simulated monitoring of two industrial robots. *Ergonomics*, 34(5):531–546.

Khalil, W. et Kleinfinger, J. (1986). A new geometric notation for open and closed-loop robots. *In IEEE International Conference on Robotics and Automation.*

Kidd, C. D. et Breazeal, C. (2005). Human-robot interaction experiments : Lessons learned. *In Robot Companions : Hard Problems and Open Challenges in Robot-Human Interaction Symposium at Social Intelligence and Interaction in Animals, Robots and Agents (AISB)*, pages 141–142.

Kilner, J., Hamilton, A. et Blakemore, S.-J. (2007). Interference effect of observed human movement on action is due to velocity profile of biological motion. *Social Neuroscience*, 2:158–166.

Kilner, J., Paulignan, Y. et Blakemore, S. (2003). An interference effect of observed biological movement on action. *Current Biology*, 13(6):522–525.

Kim, J. et Andre, E. (2008). Emotion recognition based on physiological changes in music listening. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 30(12):2067–2083.

Kock, S., Vittor, T., Matthias, B., Jerregard, H., Kallman, M., Lundberg, I., Mellander, R. et Hedelind, M. (2011). Robot concept for scalable, flexible assembly automation : A technology study on a harmless dual-armed robot. *In 2011 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM)*, pages 1–5.

Kooijmans, T., Kanda, T., Bartneck, C., Ishiguro, H. et Hagita, N. (2007). Accelerating robot development through integral analysis of human-robot interaction. *IEEE Transactions on Robotics*, 23(5):1001–1012.

Koskinen, J., Heikkila, T. et Pulkkinen, T. (2009). Monitoring of co-operative assembly tasks : functional, safety and quality aspects. *In 2009 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM)*, pages 310–315.

Kosuge, K., Sato, M. et Kazamura, N. (2000). Mobile robot helper. *In Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, volume 1, pages 583–588.

Krüger, J., Bernhardt, R., Surdilovic, D. et Spur, G. (2006). Intelligent Assist Systems for flexible assembly. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 55(1):29–32.

Krüger, J., Katschinski, V., Surdilovic, D. et Schreck, G. (2010). Flexible assembly systems through workplace-sharing and time-sharing human-machine cooperation (PISA). *41st International Symposium on Robotics (ISR) and 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK)*, 1:1–5.

Krüger, J., Lien, T. K. et Verl, A. (2009). Cooperation of human and machines in assembly lines. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(2):628–646.

Krüger, J., Nickolay, B., Heyer, P. et Seliger, G. (2005). Image based 3D surveillance for flexible man-robot-cooperation. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 54(1):19–22.

Kucuk, S. et Bingul, Z. (2006). *Robot Kinematics : Forward and Inverse Kinematics*, chapitre 4, pages 117–148. Industrial Robotics : Theory, Modelling, Control.

Kulić, D. et Croft, E. (2005). Anxiety detection during human-robot interaction. *In Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 616–621.

Kulić, D. et Croft, E. (2007). Affective state estimation for human-robot interaction. *IEEE Transactions on Robotics*, 23(5):991–1000.

Kupferberg, A., Glasauer, S., Huber, M., Rickert, M., Knoll, A. et Brandt, T. (2011). Biological movement increases acceptance of humanoid robots as human partners in motor interaction. *AI & Society*, 26:339–345.

Laengle, T., Hoeniger, T. et Zhu, L. (1997). Cooperation in human-robot-teams. *In Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pages 1297–1301 vol.3.

Lang, P. (1995). The emotion probe : Studies of motivation and attention. *American psychologist*, 50:372–372.

Lenz, C. (2011). *Context-aware human-robot collaboration as a basis for future cognitive factories.* Thèse de doctorat, Technische Universität München.

Lenz, C., Grimm, M., Röder, T. et Knoll, A. (2012). Fusing multiple Kinects to survey shared human-robot workspaces. Rapport technique, Technische Universität München.

Li, D., Rau, P. L. P. et Li, Y. (2010). A cross-cultural study : Effect of robot appearance and task. *International Journal of Social Robotics*, 2(2):175–186.

MacDorman, K. F. (2006). Subjective ratings of robot video clips for human likeness, familiarity, and eeriness : An exploration of the uncanny valley. *In Proceedings of the ICCS/CogSci-2006 Symposium : Toward Social Mechanisms of Android Science.*

Maeda, Y., Hara, T. et Arai, T. (2001). Human-robot cooperative manipulation with motion estimation. *In Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, volume 4, pages 2240–2245 vol.4.

Minato, T., Shimada, M., Itakura, S., Lee, K. et Ishiguro, H. (2005). Does gaze reveal the human likeness of an android ? *In Proceedings of the 4th International Conference on Development and Learning*, pages 106–111.

Morasso, P. (1981). Spatial control of arm movements. *Experimental Brain Research*, 2:223–227.

Mori, M. (1970). The uncanny valley. *Energy*, 7:33–35.

Mörtl, A., Lawitzky, M., Kucukyilmaz, A., Sezgin, M., Basdogan, C. et Hirche, S. (2012). The role of roles : Physical cooperation between humans and robots. *The International Journal of Robotics Research*, 31:1656–1674.

Nalin, M., Baroni, I., Sanna, A. et Pozzi, C. (2012). Robotic companion for diabetic children : Emotional and educational support to diabetic children, through an interactive robot. *In Proceedings of the 11th International Conference on Interaction Design and Children (IDC)*, pages 260–263.

Navarro, J. (2009). *Coopération homme-machine en conduite automobile assistée : Contrôle cognitif et contrôle de la trajectoire.* Thèse de doctorat, Université de Nantes.

Nielsen, J. (1993). *Usability engineering.* Academic Press, Boston.

Nishio, S., Ishiguro, H. et Hagita, N. (2007). Geminoid : Teleoperated android of an existing person. *In Humanoid Robots : New Developments*, pages 343–352. I-Tech Education and Publishing.

Nomura, T., Kanda, T., Suzuki, T. et Kato, K. (2004). Psychology in human-robot communication : an attempt through investigation of negative attitudes and anxiety toward robots. *In Proceedings of the 13th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN)*, pages 35–40.

Nomura, T., Suzuki, T., Kanda, T., Han, J., Shin, N., Burke, J. et Kato, K. (2008). What people assume about humanoid and animal-type robots : Cross-cultural analysis between Japan, Korea, and the United States. *International Journal of Humanoid Robotics*, 5(1):25–46.

Nonaka, S., Inoue, K., Arai, T. et Mae, Y. (2004). Evaluation of human sense of security for coexisting robots using virtual reality. 1st report : evaluation of pick and place motion of humanoid robots. *In Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, volume 3, pages 2770–2775.

Oberer, S. et Schraft, R. D. (2007). Robot-dummy crash tests for robot safety assessment. *In Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 2934–2939.

Ogawa, K., Nishio, S., Koda, K., Taura, K., Minato, T., Ishii, C. T. et Ishiguro, H. (2011). Telenoid : Tele-presence android for communication. *In ACM SIGGRAPH 2011 Emerging Technologies*, pages 1–15.

Oztop, E., Chaminade, T. et Franklin, D. (2004). Human-humanoid interaction : is a humanoid robot perceived as a human ? *In Proceedings of the 4th IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots*, volume 2, pages 830–841.

Parasuraman, R., Sheridan, T. B. et Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans*, 30(3):286–297.

Parlitz, C., Hägele, M., Klein, P., Seifert, J. et Dautenhahn, K. (2008). Care-O-bot 3 - Rationale for human-robot interaction design. *In Proceedings of the 39th International Symposium on Robotics (ISR).*

Powers, A. et Kiesler, S. (2006). The advisor robot : tracing people's mental model from a robot's physical attributes. *In Proceedings of the 1st ACM SIGCHI/SIGART conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pages 218–225.

Rani, P., Sims, J., Brackin, R. et Sarkar, N. (2002). Online stress detection using psychophysiological signals for implicit human-robot cooperation. *Robotica*, 20:673–685.

Rickert, M., Foster, M., Giuliani, M., By, T., Panin, G. et Knoll, A. (2007). Integrating language, vision and action for human robot dialog systems. *In Universal Access in Human-Computer Interaction. Ambient Interaction*, volume 4555 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 987–995. Springer Berlin / Heidelberg.

Ringbeck, T. et Hagebeuker, B. (2007). A 3D time of flight camera for object detection. *In Optical 3-D Measurement Techniques.*

Rogalski, J. (1994). Formations aux activités collectives. *Le travail humain*, 57:425–443.

Sankai, Y. (2006). Leading edge of cybernics : Robot suit HAL. *In SICE-ICASE International Joint Conference 2006.*

Sarkar, N. (2002). Psychophysiological control architecture for human-robot coordination - Concepts and initial experiments. *In Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, volume 4, pages 3719–3724.

Schraft, R., Meyer, C., Parlitz, C. et Helms, E. (2005). Powermate : A safe and intuitive robot assistant for handling and assembly tasks. *In Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 4074–4079.

Schraft, R. D., Schaeffer, C. et May, T. (1998). Care-O-bot : The concept of a system for assisting elderly or disabled persons in home environments. *Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, 4:1–6.

Sheridan, T. B. et Verplank, W. L. (1978). Human and computer control of undersea teleoperators. Rapport technique, MIT Man-Machine Systems Laboratory, Cambridge, MA.

Shi, J., Jimmerson, G., Pearson, T. et Menassa, R. (2012). Levels of human and robot collaboration for automotive manufacturing. *In Proceedings of the Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems (PerMIS)*, pages 95–100.

Shibata, S. et Inooka, H. (1998). Psychological evaluations of robot motions. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 21(6):483–494.

Shibata, T., Wada, K., Ikeda, Y. et Sabanovic, S. (2009). Cross-cultural studies on subjective evaluation of a seal robot. *Advanced Robotics*, 23(4):443–458.

Simmons, G. et Demiris, Y. (2004). Biologically inspired optimal robot arm control with signal-dependent noise. *In Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, volume 1, pages 491–496.

Strait, M. et Scheutz, M. (2014). Measuring users' responses to humans, robots, and human-like robots with functional near infrared spectroscopy. *In Proceedings of the 23rd IEEE Symposium on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN).*

Surdilovic, D., Schreck, G. et Schmidt, U. (2010). Development of collaborative robots (COBOTS) for flexible human-integrated assembly automation. *41st International Symposium on Robotics (ISR) and 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK)*, 1:1–8.

Syrdal, D. S., Dautenhahn, K., Woods, S. N., Walters, M. L. et Koay, K. L. (2007). Looking good ? Appearance preferences and robot personality inferences at zero acquaintance. Rapport technique, Proceedings of the AAAI Summer Symposium on Multidisciplinary Collaboration for Socially Assistive Robotics.

Tan, J. T. C., Duan, F., Zhang, Y., Watanabe, K., Kato, R. et Arai, T. (2009). Human-robot collaboration in cellular manufacturing : Design and development. *In Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 29–34.

Terveen, L. (1994). An overview of human-computer collaboration. Rapport technique, AAAI Fall Symposium 1993.

Thrun, S., Bennewitz, M., Burgard, W., Cremers, A., Dellaert, F., Fox, D., Hähnel, D., Rosenberg, C., Roy, N., Schulte, J. et Schulz, D. (1999). Minerva : a second-generation museum tour-guide robot. *In Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, volume 3, pages 1999–2005.

Tricot, A., Plégat-Soutjis, F., Camps, J. F., Amiel, A., Lutz, G. et Morcillo, A. (2003). Utilité, utilisabilité, acceptabilité : interpréter les relations entre trois dimensions de l'évaluation des EIAH. *Environnements informatiques pour l'apprentissage humain*, 1:391–402.

Uno, Y., Kawato, M. et Suzuki, R. (1989). Formation and control of optimal trajectory in human multijoint arm movement. *Biological Cybernetics*, 61:89–101.

Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B. et Davis, F. D. (2003). User acceptance of information technology : Toward a unified view. *Management Information Systems Quarterly*, 27(3):425–478.

Vercher, J.-L. (2006). Perception and synthesis of biologically plausible motion : From human physiology to virtual reality. *In Gesture in Human-Computer Interaction and Simulation*, volume 3881 de *Lecture Notes in Computer Science*, pages 1–12. Springer Berlin Heidelberg.

Vercher, J.-L. et Bourdin, C. (2012). Sensorimotricité et performance motrice. *In La psychologie cognitive*, Cogniprisme. Maison des sciences de l'homme.

Vesper, C. (2014). How to support action prediction : Evidence from human coordination tasks. *In Proceedings of the 23rd IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN).*

Viviani, P. et Terzuolo, C. (1982). Trajectory determines movement dynamics. *Neuroscience*, 7(2):431– 437.

Walters, M. L., Dautenhahn, K., te Boekhorst, R., Koay, K. L. et Woods, S. N. (2007). Exploring the design space of robot appearance and behavior in an attention-seeking 'living room' scenario for a robot companion. *In IEEE Symposium on Artificial Life (ALIFE)*, pages 341–347.

Walters, M. L., Syrdal, D. S., Dautenhahn, K., te Boekhorst, R. et Koay, K. L. (2008). Avoiding the uncanny valley : robot appearance, personality and consistency of behavior in an attention-seeking home scenario for a robot companion. *Autonomous Robots*, 24(2):159–178.

Wannasuphoprasit, W., Akella, P., Peshkin, M. et Colgate, J. (1998). Cobots : A novel material handling technology. *In International Mechanical Engineering Congress and Exposition (ASME).*

Weistroffer, V., Paljic, A., Callebert, L. et Fuchs, P. (2013). A methodology to assess the acceptability of human-robot collaboration using virtual reality. *In Proceedings of the 19th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST)*, pages 39–48, Singapore.

Weistroffer, V., Paljic, A., Fuchs, P., Hugues, O., Chodacki, J.-P., Ligot, P. et Morais, A. (2014). Assessing the acceptability of human-robot co-presence on assembly lines : A comparison between actual situations and their virtual reality counterparts. *In Proceedings of the 23rd IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN)*, Edinburgh, Scotland. Best Paper Finalist.

Welman, C. (1993). Inverse kinematics and geometric constraints for articulated figure manipulation. Mémoire de D.E.A., Simon Fraser University.

Weng, Y.-H., Chen, C.-H. et Sun, C.-T. (2009). Toward the human-robot co-existence society : On safety intelligence for next generation robots. *International Journal of Social Robotics*, 1(4):267–282.

Wojtara, T., Uchihara, M., Murayama, H., Shimoda, S., Sakai, S., Fujimoto, H. et Kimura, H. (2009). Human-robot collaboration in precise positioning of a three-dimensional object. *Automatica*, 45(2):333–342.

Woods, S., Walters, M. L., Koay, K. L. et Dautenhahn, K. (2006a). Comparing human robot interaction scenarios using live and video based methods : towards a novel methodological approach. *In Proceedings of the 9th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, pages 750–755.

Woods, S. N., Walters, M. L., Koay, K. L. et Dautenhahn, K. (2006b). Methodological issues in HRI : A comparison of live and video-based methods in robot to human approach direction trials. *In Proceedings of the 15th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN)*, pages 51–58.

Yagoda, R. E. et Gillan, D. J. (2012). You want me to trust a robot ? The development of a human-robot interaction trust scale. *International Journal of Social Robotics*, 4(3):235–248.

Yamada, Y., Konosu, H., Morizono, T. et Umetani, Y. (1999). Proposal of Skill-Assist : a system of assisting human workers by reflecting their skills in positioning tasks. *In Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, volume 4, pages 11–16.

Zanchettin, A. M., Bascetta, L. et Rocco, P. (2013). Acceptability of robotic manipulators in shared working environments through human-like redundancy resolution. *Applied Ergonomics*, 44(6):982–989.

Zieba, S., Polet, P., Vanderhaegen, F. et Debernard, S. (2009). Resilience of a human-robot system using adjustable autonomy and human-robot collaborative control. *International Journal of Adaptive and Innovative Systems*, 1:13–29.

Annexes

Annexe A

Le contrôle de bras manipulateurs

Cette annexe présente de manière générale les principes de la modélisation et du contrôle de robots de type bras manipulateur, par cinématique directe et par cinématique inverse.

A.1 La modélisation et la cinématique robotique

Les robots de type bras manipulateur ont une configuration pouvant être assimilée à celle d'un bras ou d'un squelette humain. On la représente généralement par une chaîne de segments reliés entre eux par des joints. Dans la pratique, on distingue les joints de type rotationnel (tournant d'un angle θ autour d'un axe) et les joints de type translationnel (glissant d'une valeur d sur un axe), même si d'autres types de joints existent. Chaque joint est reperé localement par rapport au précédent [Welman, 1993], grâce aux paramètres θ ou d. Dans la suite, nous ne considérons que des joints de type rotationnel (voir Figure A.1 pour un exemple).

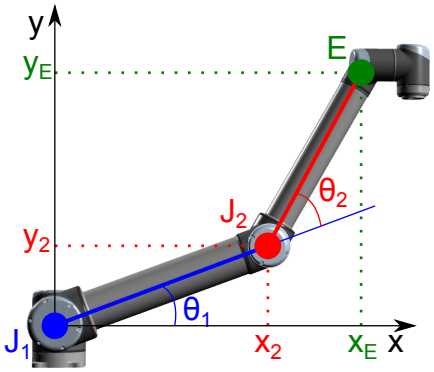


FIGURE A.1 – Un exemple de modélisation de bras articulé (ici avec deux axes)

Pour contrôler ce type de robot, on agit directement sur l'état des joints $\boldsymbol{\theta}$: chaque segment du robot peut être déplacé en le faisant tourner autour de l'axe du joint adéquat. La configuration d'un bras manipulateur est donc entièrement décrite par l'état de ses joints. Cependant, il est parfois plus pratique de contrôler le robot en position, par exemple pour imposer une trajectoire à l'effecteur final dans l'espace cartésien. Il faut alors déterminer l'état des joints $\boldsymbol{\theta}$ du robot qui permet d'atteindre l'état $\mathbf{x}$ désiré pour l'effecteur final (position, orientation). Le passage de l'état des joints $\boldsymbol{\theta}$ à l'état des effecteurs $\mathbf{x}$ constitue la **cinématique directe** du robot (*forward kinematics*), tandis que la **cinématique inverse** (*inverse kinematics*) effectue le

procédé contraire (voir Figure A.2). Alors que la cinématique directe peut être résolue facilement de manière unique, la cinématique inverse est un problème plus compliqué qui peut posséder plusieurs solutions, une seule ou aucune.

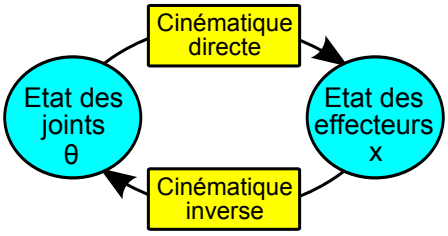
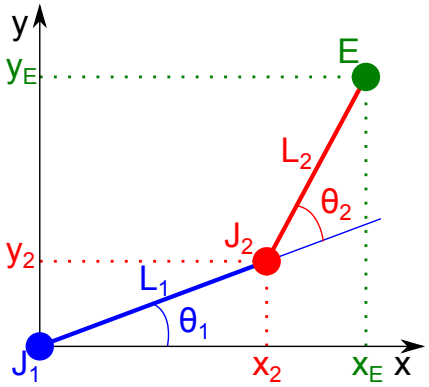


FIGURE A.2 – Principe de la cinématique directe et inverse

A.2 La cinématique directe

La cinématique directe permet de calculer l'état $\mathbf{x}$ de l'effecteur du bras manipulateur connaissant l'état $\boldsymbol{\theta}$ de tous ses joints. Ce n'est pas un problème difficile : chaque bras manipulateur dispose d'une solution analytique unique au problème de cinématique directe [Kucuk et Bingul, 2006]. On peut distinguer deux méthodes pour résoudre ce problème : géométrique et algébrique.

La méthode géométrique visualise le problème et le résoud à l'aide de formules trigonométriques. Elle est surtout adaptée à des problèmes simples (2 joints, problème plan), comme celui de la Figure A.3.



$$\begin{cases} x_2 &= L_1 \cos(\theta_1) \\ y_2 &= L_1 \sin(\theta_1) \end{cases}$$

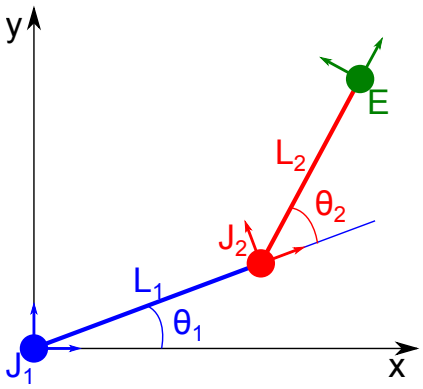
$$\begin{cases} x_E &= L_1 \cos(\theta_1) + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ y_E &= L_1 \sin(\theta_1) + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{cases}$$

FIGURE A.3 – Résolution géométrique du problème de cinématique directe

La méthode algébrique définit pour chaque joint i un référentiel local $\mathcal{R}_i$ et une transformation locale $\mathbf{M}_i$ permettant de passer du référentiel $\mathcal{R}_i$ au référentiel $\mathcal{R}_{i+1}$ (matrice de passage 4×4). Ainsi, les coordonnées $\mathbf{X}_{\mathcal{R}_i}$ d'un point dans le référentiel $\mathcal{R}_i$ s'écrivent $\mathbf{X}_{\mathcal{R}_i} = \mathbf{M}_i \mathbf{X}_{\mathcal{R}_{i+1}}$, où $\mathbf{X}_{\mathcal{R}_{i+1}}$ sont les coordonnées du point dans le référentiel $\mathcal{R}_{i+1}$. La transformation $\mathbf{M}_i$ dépend du paramètre θ_i du joint i. Afin de connaître la transformation $\mathbf{M}_j^i$ permettant de passer du référentiel $\mathcal{R}_j$ au référentiel $\mathcal{R}_{i+1}$ ($j < i$), il suffit de concacaténer chacune des transformations locales [Welman, 1993] : $\mathbf{M}_j^i = \mathbf{M}_j ... \mathbf{M}_i$. Ainsi, pour connaître la transformation globale depuis le premier joint jusqu'au joint $i+1$, on a $\mathbf{M}_1^i = \mathbf{M}_1 ... \mathbf{M}_i$.

La méthode algébrique nécessite de bien modéliser son système au préalable : il faut assigner un référentiel $\mathcal{R}_i$ à chaque joint i et déterminer chaque transformation locale $\mathbf{M}_i$. Différentes

notations existent pour mener à bien cette modélisation. La plus simple consiste à assigner un référentiel arbitraire (ou pratique vis-à-vis de la configuration du robot) à chaque joint, puis de décomposer chaque transformation $\mathbf{M}_i$ en une translation et une rotation [Welman, 1993] : $\mathbf{M}_i = \mathbf{T}_i(x_i, y_i, z_i)\mathbf{R}_i(\theta_i)$, où $\mathbf{T}_i(x_i, y_i, z_i)$ représente la translation du joint i au joint $i+1$ et $\mathbf{R}_i(\theta_i)$ représente la rotation d'angle θ_i autour de l'axe du joint i. Cette notation nécessite cependant de connaître, pour chaque transformation, le vecteur de translation et le vecteur de rotation. La Figure A.4 montre un exemple de résolution.



$$M_1 = \begin{pmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & L_1\cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & L_1\sin(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M_2 = \begin{pmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & L_2\cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & L_2\sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M_1^2 = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & L_1\cos(\theta_1) + L_2\cos(\theta_1+\theta_2) \\ \cdot & \cdot & \cdot & L_1\sin(\theta_1) + L_2\sin(\theta_1+\theta_2) \\ \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & 1 \end{pmatrix}$$

FIGURE A.4 – Résolution algébrique du problème de cinématique directe

Une autre notation, largement utilisée dans le domaine de la robotique et dérivée sous d'autres formes, est celle de Denavit et Hartenberg [Khalil et Kleinfinger, 1986; Kucuk et Bingul, 2006]. Cette notation définit des règles afin de placer les référentiels de chaque joint dans des positions/orientations prédéfinies (par exemple : axe de rotation selon Z), pour ainsi obtenir une forme générique de transformation $\mathbf{M}_i$ ne dépendant que de 4 paramètres, ce qui est un atout de cette notation. En revanche, le placement des référentiels au préalable n'est pas toujours intuitif et prête parfois à confusion [Khalil et Kleinfinger, 1986].

Quelle que soit la méthode employée, il est toujours possible de déterminer de façon unique l'état $\mathbf{x}$ des effecteurs (position, orientation) en fonction de l'état $\boldsymbol{\theta}$ des joints, sous la forme :

$$\mathbf{x} = \mathbf{f}(\boldsymbol{\theta}) \tag{A.1}$$

C'est le principe de la cinématique directe.

A.3 La cinématique inverse

La cinématique inverse consiste à déterminer, étant donné l'état $\mathbf{x}$ des effecteurs, l'état $\boldsymbol{\theta}$ des joints permettant d'atteindre cet état final. C'est le problème inverse de la cinématique directe, qui est beaucoup plus compliqué et ne possède pas de solution analytique générique [Welman, 1993]. Selon la configuration du bras manipulateur, il peut exister une unique solution, plusieurs ou aucune. Pour résoudre ce problème, on peut distinguer deux approches : analytique et numérique.

Kucuk et Bingul [Kucuk et Bingul, 2006] présentent deux méthodes analytiques pour le problème de cinématique inverse : géométrique et algébrique. Ces méthodes consistent à inverser analytiquement le problème de cinématique directe. Elles sont fastidieuses (nous envoyons le lecteur aux calculs de Kucuk et Bingul [Kucuk et Bingul, 2006] sur des exemples) et ne sont pas

toujours concluantes : elles sont surtout efficaces pour de petits systèmes. Elles ont également le désavantage de dépendre entièrement de la structure du bras manipulateur.

On privilégie généralement les approches numériques pour le problème de cinématique inverse. L'une de ces approches se base sur les techniques d'optimisation : on cherche à minimiser une fonction de l'état $\boldsymbol{\theta}$ des joints sous certaines contraintes [Welman, 1993]. Par exemple, on peut chercher à minimiser l'écart entre l'état cible $\mathbf{x}_{cible}$ et l'état actuel $\mathbf{x}_{actuel}$ des effecteurs, soit la fonction

$$\begin{aligned} E(\boldsymbol{\theta}) &= ||\mathbf{x}_{cible} - \mathbf{x}_{actuel}|| \\ &= ||\mathbf{x}_{cible} - \mathbf{f}(\boldsymbol{\theta})|| \end{aligned}$$

Plusieurs techniques numériques d'optimisation existent pour résoudre ce problème, la plus simple étant celle de descente de gradient. L'avantage de l'approche d'optimisation est de pouvoir customiser la fonction à minimiser et rajouter des contraintes supplémentaires (limites angulaires par exemple). Elle requiert en revanche de connaître analytiquement la fonction à minimiser (ou au moins son gradient) et est coûteuse en calculs : généralement, pour un fonctionnement en temps réel, on considère la fonction à minimiser (ou au moins son gradient) pour un système prédéfini (non générique) et on applique les techniques pour ce cas précis.

Une seconde approche numérique consiste à linéariser le problème de cinématique directe de l'Equation (A.1) sous la forme

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})\dot{\boldsymbol{\theta}}$$

où $\mathbf{J}$ est la jacobienne de $\mathbf{f}$ et s'écrit $\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \boldsymbol{\theta}}$ [Welman, 1993]. Grâce à cette équation, les variations infinitésimales $\dot{\mathbf{x}}$ de l'état des effecteurs sont reliées à celles $\dot{\boldsymbol{\theta}}$ de l'état des joints. L'idée est de pouvoir déterminer itérativement les variations $\Delta\boldsymbol{\theta}$ qui permettent de se rapprocher de l'état-cible $\mathbf{x}_{cible}$ des effecteurs (en considérant les variations $\Delta\mathbf{x} = \mathbf{x}_{cible} - \mathbf{x}_{actuel}$), et donc de résoudre :

$$\Delta\boldsymbol{\theta} = \mathbf{J}^{-1}\Delta\mathbf{x}$$

Malheureusement, $\mathbf{J}$ est rarement inversible : il faut donc trouver des méthodes numériques qui permettent d'approximer l'inverse de $\mathbf{J}$. Buss présente un rapport qui répertorie les principales méthodes de résolution à base de jacobienne [Buss, 2004] et propose une nouvelle technique [Buss et Kim, 2005]. Parmi les techniques les plus utilisées, on trouve la méthode avec transposée de la jacobienne (où α est un scalaire approprié à déterminer) :

$$\Delta\boldsymbol{\theta} = \alpha\mathbf{J}^{\mathbf{T}}\Delta\mathbf{x}$$

la méthode avec pseudo-inverse $\mathbf{J}^{\dagger}$ de la jacobienne :

$$\Delta\boldsymbol{\theta} = \mathbf{J}^{\dagger}\Delta\mathbf{x}$$

et la méthode de Levenberg-Marquardt (où λ est une constante à déterminer) :

$$\Delta\boldsymbol{\theta} = \mathbf{J}^{\mathbf{T}}(\mathbf{J}\mathbf{J}^{\mathbf{T}} + \lambda^2\mathbf{I})^{-1}\Delta\mathbf{x}$$

L'avantage des techniques à base de jacobienne est que $\mathbf{J}$ est généralement facile à calculer [Buss et Kim, 2005]. Considérons un effecteur i de position $\mathbf{x}_i = \mathbf{f}_i(\boldsymbol{\theta})$. Pour un joint rotationnel j de position $\mathbf{p}_j$, d'axe unitaire $\mathbf{a}_j$ et d'angle θ_j, on a (voir Figure A.5 pour l'interprétation géométrique) :

$$\frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial \theta_j} = \mathbf{a}_j \wedge (\mathbf{f}_i - \mathbf{p}_j)$$

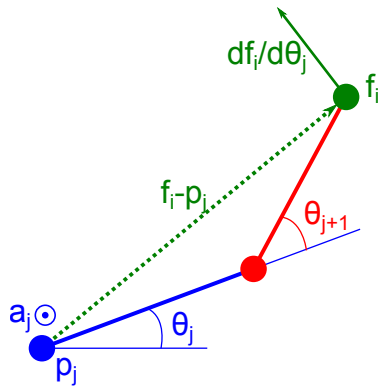


FIGURE A.5 – Interprétation géométrique du calcul de la jacobienne pour un joint rotationnel

Annexe B

Etude sur la distribution spatiale

Cette annexe se rapporte à l'expérimentation sur la distribution spatiale, effectuée pour le cas d'étude sur le montage de porte en coprésence avec un robot du Chapitre 6 (voir Figure B.1). Nous y répertorions les résultats des tests statistiques menés sur les résultats et réalisés à l'aide de l'environnement R. Les différences significatives ($p < 0{,}05$) sont à chaque fois surlignées en rouge.

FIGURE B.1 – Le poste de montage de porte en coprésence avec un robot

Le tableau B.1 présente les résultats des tests statistiques pour le questionnaire Q_c sur la coprésence (pour chaque thème et chaque question). Des tests de Friedman ont été menés pour déceler les différences significatives sur l'ensemble des conditions, tandis que des tests de Wilcoxon ont été menés pour comparer les conditions 2 à 2.

Le tableau B.2 présente les résultats des tests statistiques pour le questionnaire Q_s sur les situations d'expérimentation (pour chaque thème et chaque question). Des tests de Wilcoxon ont été menés pour comparer les situations réelle et virtuelle.

Le Tableau B.3 présente les résultats des tests statistiques pour les mesures physiologiques (rythme cardiaque et conductance de la peau). Des analyses de variance (ANOVAs) à deux variables ont été menées pour analyser l'influence de la configuration (éloignée ou proche), de la situation d'expérimentation (réelle ou virtuelle) et de leur interaction. Des ANOVAs à une variable ont été menées afin d'effectuer des comparaisons entre conditions 2 à 2.

Le Tableau B.4 présente les résultats des tests statistiques pour les données liées à la performance (nombre d'opérations non effectuées, nombre de proximités détectées et temps de complétion). Des tests de Wilcoxon ont été menés pour le nombre d'opérations non effectuées et le nombre de proximités détectées (mesures discrètes), tandis que des ANOVAs ont été menées pour le temps de complétion (mesures continues).

Résultats globaux par thèmes

	Utilisabilité		Sécurité		Compétence du robot		Impression		Acceptabilité		
	Friedman test		Friedman test		Friedman test		Friedman test		Friedman test		
	p	X^2	p	X^2	p	X^2	p	X^2	p	X^2	
	0,00085585	16,59551	0,03035916	8,921053	0,04526343	8,036496	0,8964324	0,6	0,00173449	15,09836	
	Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		
	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	
SrCe/SrCp	0,02355781	677	0,239821	594	0,4292823	322,5	0,5799147	37,5	0,04171305	51	SrCe/SrCp
SrCe/SvCe	0,03004825	354	0,2329657	429,5	0,03287083	383	0,9560735	33	0,07983872	16,5	SrCe/SvCe
SrCe/SvCp	0,4039978	573	0,142233	615,5	0,431506	323,5	0,8689613	34	0,3964136	39,5	SrCe/SvCp
SrCp/SvCe	1,7989E-05	198	0,02849228	356	0,1305433	354	0,5862692	26,5	0,00288916	4	SrCp/SvCe
SrCp/SvCp	0,1003418	393	0,8951036	522	0,9817615	289,5	0,7855257	29	0,166774	19	SrCp/SvCp
SvCe/SvCp	0,00107226	750	0,01649134	684	0,09778726	213,5	0,7850282	35	0,01244304	54	SvCe/SvCp

Résultats détaillés par questions

	Vous avez contrôlé le travail		Le robot s'est adapté		Vous vous êtes adapté		Le robot a imposé des contraintes		Vous vous êtes senti en sécurité		
	Friedman test		Friedman test		Friedman test		Friedman test		Friedman test		
	p	X^2	p	X^2	p	X^2	p	X^2	p	X^2	
	0,2666523	3,952381	0,378023	3,089552	0,01844679	10,01408	0,00573018	12,54545	0,2314062	4,294118	
	Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		
	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	
SrCe/SrCp	0,1570535	45,5	0,5484401	38	0,8560779	30	0,04141419	12,5	0,3204713	23	SrCe/SrCp
SrCe/SvCe	0,3593635	41	0,4721564	25	0,00573403	58	0,04191796	50	0,08002405	16	SrCe/SvCe
SrCe/SvCp	0,2797664	42,5	0,4502911	25	0,306936	41,5	0,1176325	17	0,3427483	23	SrCe/SvCp
SrCp/SvCe	0,7889144	29	0,1540938	18,5	0,00211752	61	0,00420076	57,5	0,4183022	24,5	SrCp/SvCe
SrCp/SvCp	0,5850809	26,5	0,204098	20	0,1709035	44,5	0,3204713	41	0,9100793	30,5	SrCp/SvCp
SvCe/SvCp	0,9572984	31	0,7780453	29	0,00737197	7	0,00658425	8	0,5589474	37,5	SvCe/SvCp

	Vous vous êtes senti stressé		La distance était adaptée		La vitesse était adaptée		Le robot était compétent		Le robot était efficace		
	Friedman test		Friedman test		Friedman test		Friedman test		Friedman test		
	p	X^2	p	X^2	p	X^2	p	X^2	p	X^2	
	0,9556315	0,3230769	0,00221422	14,57895	0,1589575	5,181818	0,5968879	1,883721	0,43827	2,711538	
	Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		
	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	
SrCe/SrCp	0,6931277	36	0,03862577	51,5	0,7703347	35	1	32	0,5047894	38	SrCe/SrCp
SrCe/SvCe	0,08002405	16	0,3164718	23	0,7695187	35	0,7168005	35,5	0,1172262	46	SrCe/SvCe
SrCe/SvCp	0,8679014	34	0,08798031	48	0,07157083	48	0,855939	30	0,650613	36,5	SrCe/SvCp
SrCp/SvCe	0,7869979	29	0,00329906	5	1	32	0,7168005	35,5	0,3231013	41	SrCp/SvCe
SrCp/SvCp	1	32	0,4349939	24,5	0,2160593	43,5	0,855939	30	1	31,5	SrCp/SvCp
SvCe/SvCp	0,7889144	35	0,00671771	56,5	0,1928758	44	0,3319755	23,5	0,3455374	23	SvCe/SvCp

	Le robot était utile		L'interaction était agréable		La collaboration était acceptable		
	Friedman test		Friedman test		Friedman test		
	p	X^2	p	X^2	p	X^2	
	0,05575127	7,571429	0,8964324	0,6	0,00173449	15,09836	
	Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		
	p	W	p	W	p	W	
SrCe/SrCp	0,4878416	38,5	0,5799147	37,5	0,04171305	51	SrCe/SrCp
SrCe/SvCe	0,1321733	46	0,9560735	33	0,07983872	16,5	SrCe/SvCe
SrCe/SvCp	0,3374772	41	0,8689613	34	0,3964136	39,5	SrCe/SvCp
SrCp/SvCe	0,3231013	41	0,5862692	26,5	0,00288916	4	SrCp/SvCe
SrCp/SvCp	0,7703347	35	0,7855257	29	0,166774	19	SrCp/SvCp
SvCe/SvCp	0,498735	25,5	0,7850282	35	0,01244304	54	SvCe/SvCp

TABLE B.1 – Les résultats des tests de Friedman et de Wilcoxon pour le questionnaire Q_c, pour chaque thème et chaque question

Résultats globaux par thèmes	Familiarisation		Utilité		Sécurité		Efficacité		Acceptabilité	
	Wilcoxon test (Sr/Sv)		Wilcoxon test (Sr/Sv)		Wilcoxon test (Sr/Sv)		Wilcoxon test (Sr/Sv)		Wilcoxon test (Sr/Sv)	
	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W
	1	127,5	0,8277994	298,5	0,4386327	146,5	0,8534112	279,5	0,573907	37,5

Résultats détaillés par questions	Vous avez eu suffisamment de temps de familiarisation		Vous étiez à l'aise avec les opérations		Le robot est un gain pour la réussite du travail		Le robot est un gain pour la santé	
	Wilcoxon test (Sr/Sv)		Wilcoxon test (Sr/Sv)		Wilcoxon test (Sr/Sv)		Wilcoxon test (Sr/Sv)	
	p	W	p	W	p	W	p	W
	0,29	24	0,43	39	0,66	36,5	0,91	30,5
	Le système vous semble utile		Vous vous êtes senti en sécurité		L'aspect du robot était sécurisant		La collaboration était efficace	
	Wilcoxon test (Sr/Sv)		Wilcoxon test (Sr/Sv)		Wilcoxon test (Sr/Sv)		Wilcoxon test (Sr/Sv)	
	p	W	p	W	p	W	p	W
	1,00	32,5	1,00	32	0,20	42,5	0,22	22
	Vous vous êtes senti efficace		Le robot était efficace		La collaboration était acceptable			
	Wilcoxon test (Sr/Sv)		Wilcoxon test (Sr/Sv)		Wilcoxon test (Sr/Sv)			
	p	W	p	W	p	W		
	0,79	35	0,37	39	0,57	37,5		

TABLE B.2 – Les résultats des tests de Wilcoxon pour le questionnaire Q_s, pour chaque thème et chaque question

		2-way Anova			1-way Anova	
		p	F		p	F
Rythme cardiaque	Sr/Sv	0,083	3,3	SrCe/SrCp	0,557	0,4
	Ce/Cp	0,332	1	SvCe/SvCp	0,855	0,03
	int. S/C	0,675	0,2	SrCe/SvCe	0,0217	5,6
				SrCp/SvCp	0,0391	4,5

		2-way Anova			1-way Anova	
		p	F		p	F
Conductance de la peau	Sr/Sv	0,0276	5,54	SrCe/SrCp	0,0372	4,6
	Ce/Cp	0,0987	2,96	SvCe/SvCp	0,679	0,2
	int. S/C	0,009	8	SrCe/SvCe	0,163	2
				SrCp/SvCp	0,0003	15,5

TABLE B.3 – Les résultats des ANOVAs pour les données liées aux mesures physiologiques

		Wilcoxon test	
		p	W
Opérations non effectuées	SrCe/SrCp	0,3512	1685
	SvCe/SvCp	0,00001	854
	SrCe/SvCe	1E-11	2664
	SrCp/SvCp	0,0027	2023,5

		Wilcoxon test	
		p	W
Proximités détectées	SrCe/SrCp	1E-11	609
	SvCe/SvCp	1E-16	308
	SrCe/SvCe	0,326	1596
	SrCp/SvCp	0,00001	855,5

		2-way Anova			1-way Anova	
		p	F		p	F
Temps de complétion	Sr/Sv	1E-16	268,5	SrCe/SrCp	0,483	0,5
	Ce/Cp	0,00275	9,8	SvCe/SvCp	0,00004	18,1
	int. S/C	0,0428	4,3	SrCe/SvCe	1E-16	130,2
				SrCp/SvCp	1E-16	168,8

TABLE B.4 – Les résultats des tests de Wilcoxon et des ANOVAs pour les données liées à la performance

Annexe C

Etude sur les mouvements

Cette annexe se rapporte à l'expérimentation sur les mouvements du cas d'étude de la feuille d'étanchéité du Chapitre 6 (voir Figure C.1).

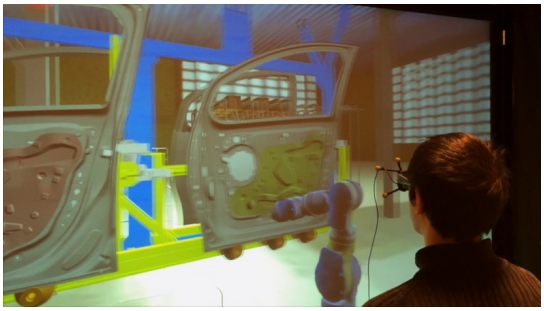


FIGURE C.1 – Le poste de pose de feuille d'étanchéité en coprésence avec un robot

La Figure C.2 représente les détails liés à la mise en place des expérimentations : la trajectoire du robot et ses points d'arrêt, les dimensions du robot et sa position par rapport à la trajectoire.

Le Tableau C.1 représente les réglages utilisés pour contrôler chaque paramètre du mouvement du robot : taux d'amortissement, temps de stabilisation, angles maximums de rotation, profil de vitesse.

	P1 : Aspect de la base	P2 : Aspect de l'effecteur	P3 : Profil de vitesse
Mécanique	Aucun amortissement	Aucun amortissement	v = 0,4 m/s
Anthropomorphe	λ = 1 τ = 1,5 s	λ = 1 τ = 1 s pitch = 30° roll = 15°	$v = K / (C+A)^B$ K = 1/3 A = 0,01 B = 1/3

TABLE C.1 – Les réglages utilisés pour contrôler chaque paramètre du robot. λ : taux d'amortissement (1 = régime critique) ; τ : temps de stabilisation à 5% ; pitch et roll : angles maximums de rotation de l'effecteur ; v : vitesse.

Le Tableau C.2 présente les résultats des tests statistiques réalisés à l'aide de l'environnement

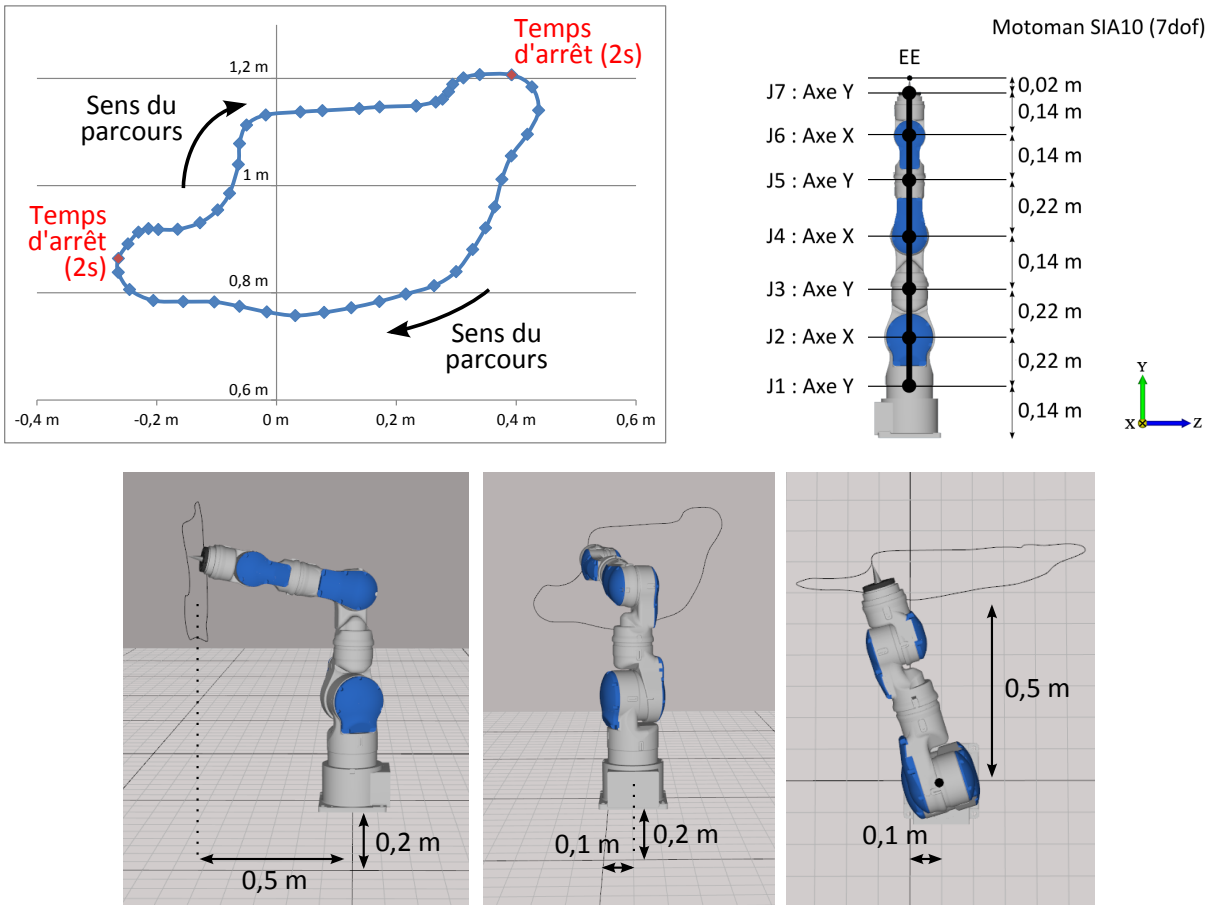


FIGURE C.2 – La trajectoire du robot et ses points d'arrêt, les dimensions du robot et sa position par rapport à la trajectoire

R. Des tests de Wilcoxon ont été menés pour comparer chaque sous-groupe de robots 2 à 2, en fonction des paramètres du mouvement (P_1, P_2 et P_3, ainsi que l'influence combinée de P_1 et P_2). Les résultats sont présentés de manière globale (pour chaque thème du questionnaire) ainsi que de manière plus détaillée (pour chaque question du questionnaire). Les différences significatives ($p < 0{,}05$) sont surlignées en rouge.

La Figure C.3 présente les résultats complets du questionnaire sur les mouvements. Pour chaque question, les moyennes des réponses pour chaque robot sont représentées.

Résultats globaux par thèmes

	Anthropo.		Naturel		Compétence		Sécurité		Impression		
	Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		
	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	
P1 rigide/ P1 souple	0,5563991	2731,5	3,555E-08	87537	0,8977135	109992,5	0,008187	324965,5	0,5734047	11740,5	P1 rigide/ P1 souple
P2 rigide/ P2 souple	3,463E-05	1613	1,594E-50	49913	0,0034678	98597,5	1,243E-08	259487	2,55E-06	8600	P2 rigide/ P2 souple
P3 linéaire/ P3 anthropo	0,5678154	2727,5	0,545945	111920	0,4348362	106595,5	0,0266518	321607	0,1586611	13237,5	P3 linéaire/ P3 anthropo
P1P2 rigides/ P1 souple	0,3070918	576	4,993E-27	13591	0,6430246	26839	0,0228657	70782	0,0142542	2438	P1P2 rigides/ P1 souple
P1P2 rigides/ P2 souple	1,953E-07	234	3,586E-54	6454	0,0020766	23601,5	3,658E-20	52588,5	5,788E-10	1485	P1P2 rigides/ P2 souple
P1P2 rigides/ P1P2 souples	0,0210853	468	4,239E-42	8959	0,053326	24966	0,0729303	71435	0,0001652	2093,5	P1P2 rigides/ P1P2 souples
P1 souple/ P2 souple	0,00136	373,5	7,835E-14	16878	0,0409359	24577	2,626E-08	59853	0,0067181	2300	P1 souple/ P2 souple
P1 souple/ P1P2 souples	0,2019621	537,5	5,464E-12	17622	0,1632079	25453	0,8806252	75610,5	0,2440412	2721,5	P1 souple/ P1P2 souples
P2 souple/ P1P2 souples	0,1747129	531	0,8482613	27647	0,6526389	26747,5	1,337E-06	61598,5	0,1620322	2659	P2 souple/ P1P2 souples

Résultats détaillés par questions

	Plus ou moins humain		Plus ou moins naturel		Plus ou moins souple		Plus ou moins mécanique		Plus ou moins compétent		Plus ou moins rapide		Préférence au travail		
	Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		
	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	
P1 rigide/ P1 souple	0,5563991	2731,5	0,0901913	10861,5	2,935E-07	8220,5	0,0151649	14005,5	0,3765717	12781	0,5673096	11775	0,8600122	12034	P1 rigide/ P1 souple
P2 rigide/ P2 souple	3,463E-05	1613	2,33E-11	7016	1,88E-34	2745	6,69E-15	18061,5	0,1160888	11079	0,6918063	11895,5	0,0033247	9945	P2 rigide/ P2 souple
P3 linéaire/ P3 anthropo	0,5678154	2727,5	0,7787989	12385	0,7670797	12396,5	0,7181805	11894,5	0,6410034	11844,5	0,0880354	10997	0,5221445	12653	P3 linéaire/ P3 anthropo
P1P2 rigides/ P1 souple	0,3070918	576	0,0005482	2194	1,84E-23	502	3,033E-07	4256,5	0,6251026	3138,5	0,5880475	3163,5	0,1133754	2655,5	P1P2 rigides/ P1 souple
P1P2 rigides/ P2 souple	1,95E-07	234	5,25E-14	1081	6,555E-29	94	2,64E-16	5129,5	0,070787	2631,5	0,5071278	3194	6,869E-05	2044,5	P1P2 rigides/ P2 souple
P1P2 rigides/ P1P2 souples	0,0210853	468	7,968E-09	1543	3,14E-27	199	2,64E-12	4856,5	0,7221709	2958	0,4275365	2859	0,043432	2529,5	P1P2 rigides/ P1P2 souples
P1 souple/ P2 souple	0,00136	373,5	0,0005159	2092,5	1,07E-10	1326	6,31E-05	4122	0,0911114	2613	0,8961284	3075,5	0,0650041	2536,5	P1 souple/ P2 souple
P1 souple/ P1P2 souples	0,2019621	537,5	0,007095	2299,5	8,93E-13	1126	0,0007762	3953,5	0,5228682	2876,5	0,2795652	2767	0,4505326	2834,5	P1 souple/ P1P2 souples
P2 souple/ P1P2 souples	0,1747129	531	0,7387557	2951	0,2843785	3322,5	0,6809797	3153,5	0,523301	2870,5	0,2460179	3340	0,3459751	2782,5	P2 souple/ P1P2 souples

	Plus ou moins agressif		Plus ou moins relaxant		Plus ou moins prévisible		Sentiment de sécurité		Sentiment de stress		Impression générale		
	Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		
	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	
P1 rigide/ P1 souple	0,8655872	12294,5	0,4880472	12685	0,0004851	14485,5	0,0566167	13427	0,5302399	11761,5	0,5734047	11740,5	P1 rigide/ P1 souple
P2 rigide/ P2 souple	4,056E-06	15599	1,72E-09	7681,5	0,0107721	13862	0,0188082	10616,5	0,0525534	13422,5	2,55E-06	8600	P2 rigide/ P2 souple
P3 linéaire/ P3 anthropo	0,2780183	11360	0,1374082	13275	0,6118453	12505,5	0,4616409	12654,5	0,362537	11578,5	0,1586611	13237,5	P3 linéaire/ P3 anthropo
P1P2 rigides/ P1 souple	2,876E-05	4004	0,0141711	2481,5	0,0004366	3696	0,6522201	3127,5	0,1765372	3301	0,0142542	2438	P1P2 rigides/ P1 souple
P1P2 rigides/ P2 souple	3,016E-13	4836	5,24E-14	1135	0,0299391	3503	0,0002988	2314	0,000675	3756	5,79E-10	1485	P1P2 rigides/ P2 souple
P1P2 rigides/ P1P2 souples	0,0030554	3772	9,278E-05	2094,5	1,01E-05	4044	0,770933	2977,5	0,3915702	3222,5	0,0001652	2093,5	P1P2 rigides/ P1P2 souples
P1 souple/ P2 souple	0,0014335	3903	5,567E-06	1815	0,5345908	2891	0,0055689	2362,5	0,0912571	3453	0,0067181	2300	P1 souple/ P2 souple
P1 souple/ P1P2 souples	0,8669911	3088	0,1331683	2637	0,1286747	3424	0,7557904	2962,5	0,8357471	2991	0,2440412	2721,5	P1 souple/ P1P2 souples
P2 souple/ P1P2 souples	0,0100101	3746,5	0,0031208	2244	0,0500837	2531,5	0,0304137	2483,5	0,0842042	3477	0,1620322	2659	P2 souple/ P1P2 souples

TABLE C.2 – Les résultats des tests de Wilcoxon pour l'analyse du questionnaire sur les mouvements des robots : analyse par paramètres (P_1, P_2, P_3) et présentation globale (par thèmes) et détaillée (par questions).

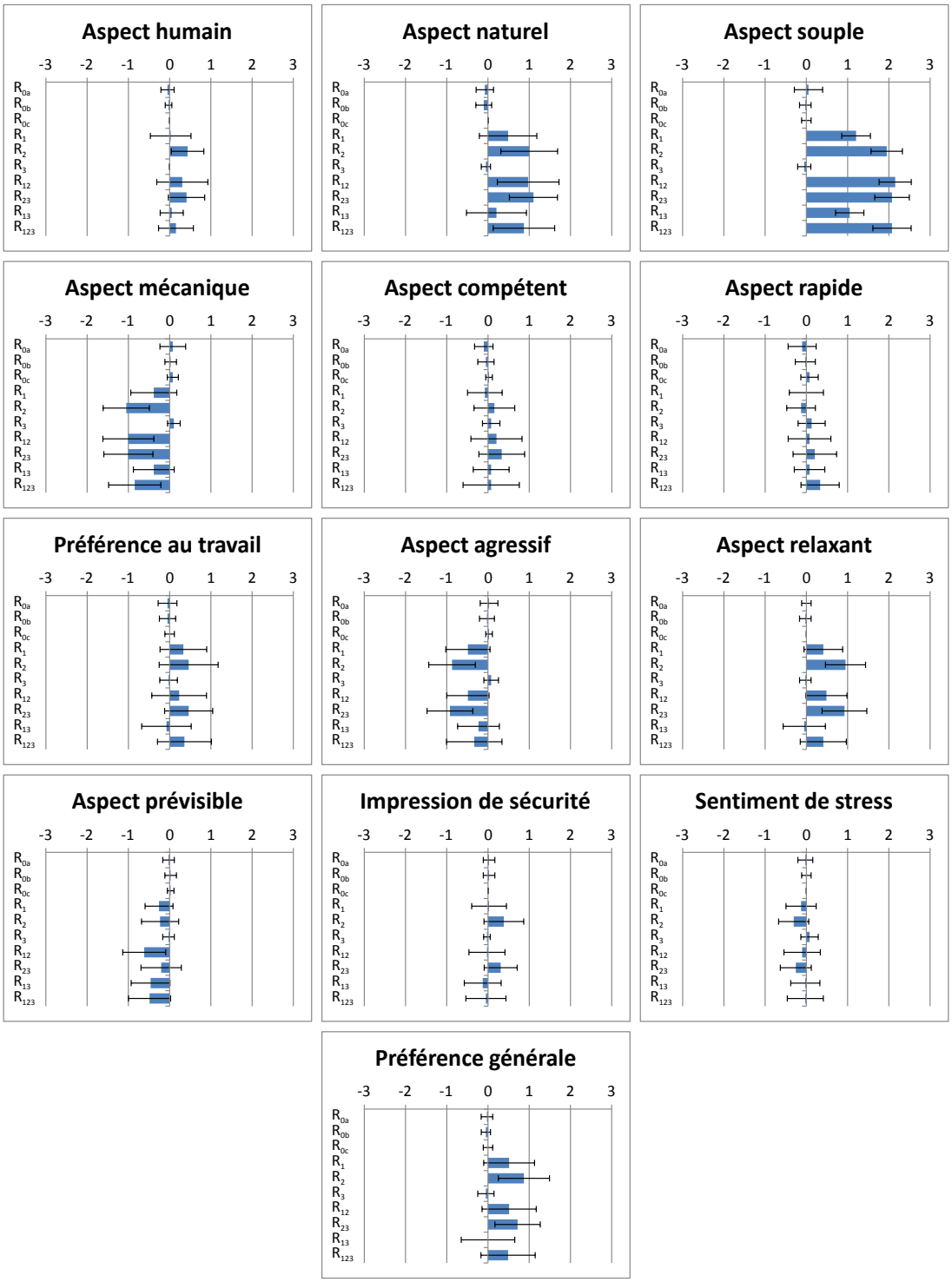


FIGURE C.3 – Les résultats complets du questionnaire pour chaque robot (moyenne sur tous les utilisateurs)

Annexe D

Etude sur l'apparence et les mouvements

Cette annexe se rapporte à l'expérimentation sur l'apparence et les mouvements des robots du Chapitre 7 (voir Figure D.1). Nous y répertorions les résultats des tests statistiques menés sur les résultats et réalisés à l'aide de l'environnement R. Les différences significatives ($p < 0{,}05$) sont à chaque fois surlignées en rouge.

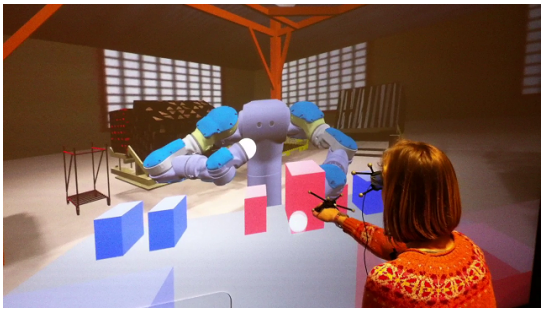


FIGURE D.1 – Le scénario d'échange d'objets pour l'étude sur l'apparence et les mouvements des robots

Le Tableau D.1 présente les résultats des tests statistiques pour le questionnaire Q_R sur l'apparence des robots. Des tests de Friedman ont été menés pour déceler les différences significatives globales entre robots tandis que des tests de Wilcoxon ont effectué des comparaisons de robots 2 à 2.

	Anthropomorphisme		Compétence		Relaxation		Sécurité		Impression		
	Friedman test		Friedman test		Friedman test		Friedman test		Friedman test		
	p	X^2	p	X^2	p	X^2	p	X^2	p	X^2	
	4,69E-07	29,14667	0,1330984	4,033333	0,00083377	14,1791	0,00018224	17,22034	0,00034934	15,91892	
	Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		
	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	
R1/R2	9,78E-05	341	0,05227531	269	0,00257431	308,5	0,00157205	314	6,23E-05	344	R1/R2
R1/R3	2,37E-06	28,5	0,4356627	172	0,03153896	122	0,00817431	104	0,00279513	91	R1/R3
R2/R3	0,00430843	98	0,2349252	242	0,7748905	210,5	1	200,5	0,8538212	207	R2/R3

TABLE D.1 – Les résultats des tests de Friedman et de Wilcoxon pour le questionnaire Q_R sur l'apparence des robots

Le Tableau D.2 présente les résultats des tests statistiques pour le questionnaire Q_M sur les mouvements des robots. Des tests de Friedman et de Wilcoxon (comparaisons 2 à 2) ont été menés pour déceler les différences significatives entre les mouvements (M_1, M_2) de chaque robot. Des tests statistiques ont également été menés sur les différences de scores entre M_1 et M_2 ($\Delta = M_2 - M_1$) pour chaque robot.

	Anthropomorphisme		Compétence		Relaxation		Sécurité		Impression		
	Friedman test		Friedman test		Friedman test		Friedman test		Friedman test		
	p	X^2	p	X^2	p	X^2	p	X^2	p	X^2	
	0,00520202	16,65535	0,466565	4,60039	0,2948418	6,118677	0,02003291	13,38415	0,08391338	9,708995	
	Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		
	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	
R1M1/R1M2	0,00292295	92,5	0,1582755	249,5	0,9225316	196	0,4934807	224,5	0,2672491	160,5	R1M1/R1M2
R1M1/R2M1	0,0013308	316	0,9882415	199	0,1692043	249,5	0,01920445	281	0,1755035	248,5	R1M1/R2M1
R1M1/R2M2	0,00010983	339,5	0,2686041	161,5	0,530159	223	0,104408	258	0,2065486	245,5	R1M1/R2M2
R1M1/R3M1	0,02860511	121	0,7003639	214	0,2305714	156,5	0,09270243	141	0,05860231	133,5	R1M1/R3M1
R1M1/R3M2	0,0160034	113	0,3344767	234,5	0,7287361	187	0,1728261	151,5	0,8669341	206,5	R1M1/R3M2
R1M2/R2M1	0,5439589	178	0,08924165	257,5	0,144698	251,5	0,00779956	293,5	0,8296646	208	R1M2/R2M1
R1M2/R2M2	0,5669982	220,5	0,6581463	215,5	0,5628309	221	0,03832392	274,5	0,7272937	212,5	R1M2/R2M2
R1M2/R3M1	0,1921555	247	0,2818515	162	0,1890834	152,5	0,03362072	124,5	0,5545285	179,5	R1M2/R3M1
R1M2/R3M2	0,659252	216	0,7527778	188,5	0,6635419	184	0,05819962	132	0,2332688	242,5	R1M2/R3M2
R2M1/R2M2	0,1415497	148	0,1826232	244,5	0,3894237	230,5	0,7368546	212	1	200,5	R2M1/R2M2
R2M1/R3M1	0,2895605	238	0,5881797	219	0,9321384	196,5	0,5764132	219,5	0,6230846	182,5	R2M1/R3M1
R2M1/R3M2	0,9656534	202	0,221129	242,5	0,3538657	233	0,4078455	229	0,1163112	256,5	R2M1/R3M2
R2M2/R3M1	0,02970586	277,5	0,5139726	177	0,4486676	172,5	0,8852887	205,5	0,7614854	189	R2M2/R3M1
R2M2/R3M2	0,2879096	237,5	0,9424492	203	0,8439274	207,5	0,7623725	211	0,1730756	249	R2M2/R3M2
R3M1/R3M2	0,471347	174	0,4701638	226	0,3685632	232,5	0,8183877	208,5	0,03797728	273,5	R3M1/R3M2

	Δ(Anthropo.)		Δ(Compétence)		Δ(Relaxation)		Δ(Sécurité)		Δ(Impression)		
	Friedman test		Friedman test		Friedman test		Friedman test		Friedman test		
	p	X^2	p	X^2	p	X^2	p	X^2	p	X^2	
	0,07243976	5,25	0,843824	0,3396226	0,3446529	2,130435	0,9439403	0,1153846	0,03947282	6,464286	
	Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		
	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	
R1/R2	0,05473116	129,5	0,9328135	203,5	0,3243972	164,5	0,894485	195	0,2520332	158	R1/R2
R1/R3	0,08687328	263	0,8459948	192,5	0,3015984	237	0,8176815	192	0,02433227	282,5	R1/R3
R2/R3	0,8474524	207,5	0,8327878	192	0,9073504	204,5	0,6387818	184,5	0,1302287	255	R2/R3

TABLE D.2 – Les résultats des tests de Friedman et de Wilcoxon pour le questionnaire Q_M sur les mouvements des robots

Le Tableau D.3 présente les résultats des tests statistiques liés aux mesures physiologiques. Des analyses de variance (ANOVAs) à deux variables (apparences et mouvements) ont été menées pour déceler les différences significatives liées à l'apparence des robots, à leurs mouvements ou à l'interaction entre les deux.

		2-way Anova	
		p	F
Rythme cardiaque	R1/R2/R3	0,782	0,246
	M1/M2	0,115	2,754
	int. R/M	0,817	0,203

		2-way Anova	
		p	F
Conductance de la peau	R1/R2/R3	0,46	0,794
	M1/M2	0,505	0,463
	int. R/M	0,738	0,306

		2-way Anova	
		p	F
Fréquence des SCRs	R1/R2/R3	0,227	1,55
	M1/M2	0,816	0,056
	int. R/M	0,389	0,971

Table D.3 – Les résultats des ANOVAs pour les mesures physiologiques acquises lors de l'expérimentation sur l'apparence et les mouvements des robots

Annexe E

Etude sur la distribution temporelle

Cette annexe se rapporte à l'expérimentation sur la distribution spatiale du Chapitre 7 (voir Figure E.1). Nous y répertorions les résultats des tests statistiques menés sur les résultats et réalisés à l'aide de l'environnement R. Les différences significatives ($p < 0{,}05$) sont à chaque fois surlignées en rouge.

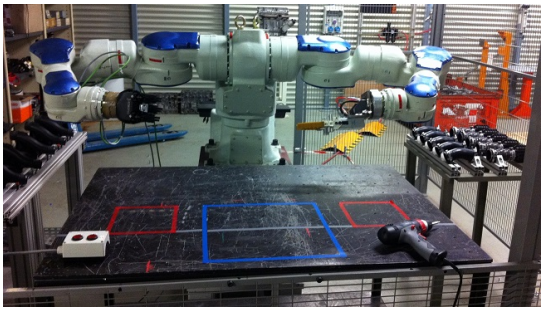


FIGURE E.1 – Le poste de montage de raccords d'air en collaboration avec un robot

Les Tableaux E.1 et E.2 présentent les résultats des tests statistiques pour le questionnaire Q_c sur la configuration de travail (pour chaque thème et pour chaque question, respectivement). Des tests de Friedman ont été menés pour déceler les différences significatives globales sur l'ensemble des conditions, pour les conditions relatives à l'environnement réel et pour les conditions relatives à l'environnement virtuel. Des tests de Wilcoxon ont été menés pour effectuer des comparaisons 2 à 2 entre les conditions (entre configurations C_1 et C_2, entre scénarios S_1, S_2 et S_3, ou entre situations S_r et S_v).

Le Tableau E.3 présente les résultats des tests statistiques pour le questionnaire Q_s sur les situations d'expérimentations (pour chaque thème et chaque question). Des tests de Wilcoxon ont été menés pour comparer les situations réelle et virtuelle.

Le Tableau E.4 présente les résultats des tests statistiques liés aux mesures physiologiques. Des analyses de variance (ANOVAs) à deux variables ont été menées pour déceler les différences significatives entre les conditions. Etant donné que les conditions varient selon trois paramètres (configuration C_1 ou C_2, scénario S_1, S_2 ou S_3, situation S_r ou S_v), l'un de ces trois paramètres a été fixé pour effectuer les analyses de variance. Dans le Tableau E.4, la colonne de gauche correspond au paramètre fixé, tandis que la colonne de droite correspond à l'influence évaluée.

Résultats globaux par thèmes		Niveau d'interaction			Utilisabilité			Sécurité			Utilité			Efficacité			Acceptabilité		
		Friedman test			Friedman test			Friedman test			Friedman test			Friedman test			Friedman test		
		p	χ^2		p	χ^2		p	χ^2		p	χ^2		p	χ^2		p	χ^2	
	Réel + Virtuel	0,00246957	28,76374		0,06792005	18,63745		0,00390837	27,46395		0,0200537	22,60962		1,80E-05	41,74161		5,28E-08	55,90998	Réel + Virtuel
	Réel	0,02294035	13,04721		0,2869111	6,203576		0,09070739	9,5		0,0526183	10,93824		0,00201188	18,89356		0,00259861	18,29493	Réel
	Virtuel	0,00296057	17,98872		0,06862612	10,24336		0,01771382	13,68852		0,03623947	11,8961		0,00089432	20,77236		2,49E-08	43,84901	Virtuel
		Wilcoxon test			Wilcoxon test			Wilcoxon test			Wilcoxon test			Wilcoxon test			Wilcoxon test		
		p	W		p	W		p	W		p	W		p	W		p	W	
Manuel vs Auto (C1 vs C2)	R S1	0,7511062	44,5		0,8804491	373,5		0,8149566	154,5		0,04130179	100,5		0,04942075	101,5		0,13852	116	R S1
	R S2	0,1728646	25		0,06733161	260,5		0,2063315	123		0,06696614	106		0,01385299	89,5		0,04278177	99	R S2
	R S3	0,7473612	36,5		0,2135962	294		0,1615732	119,5		0,5042487	141		0,09848694	111		0,03165542	95,5	R S3
	V S1	0,274202	28		0,04976847	475,5		0,1350002	207,5		0,2439168	126,5		0,1261959	115		0,871167	156,5	V S1
	V S2	0,7399334	44,5		0,1922384	290,5		0,3424912	133		0,06669933	105,5		0,01262965	87		0,01401217	85,5	V S2
	V S3	0,8191172	37,5		0,2830018	303,5		0,428033	137,5		0,8962184	166,5		0,18631985	121,5		0,00162642	64,5	V S3
Scénario S1 vs Scénario S2 vs Scénario S3	R C1 S1/S2	0,8565592	38		0,1362475	449,5		0,4993794	183		0,6813579	149		0,9737477	163,5		0,7117927	174	R C1 S1/S2
	R C1 S1/S3	0,2781276	28		0,3147199	422		0,741833	172,5		0,5687748	144		0,9742483	160,5		0,8343291	169	R C1 S1/S3
	R C1 S2/S3	0,3658533	30		0,7652133	347		0,7049629	150		0,870794	156,5		0,96011195	160		0,8851887	157	R C1 S2/S3
	R C2 S1/S2	0,04960036	18,5		0,7160409	343,5		0,6532654	148		0,408898	137,5		0,76304246	171,5		0,9867937	161	R C2 S1/S2
	R C2 S1/S3	0,0670298	20		0,8036682	350		0,4152209	137,5		0,5811559	179		0,54631198	180,5		0,6393952	147,5	R C2 S1/S3
	R C2 S2/S3	0,9256666	42		0,8279851	377		0,8156319	154,5		0,3048091	193,5		0,7757014	171		0,6651542	148,5	R C2 S2/S3
	V C1 S1/S2	0,01017647	12		0,05527913	473		0,4137852	187		0,3454916	191,5		0,5375127	181		0,1146496	211,5	V C1 S1/S2
	V C1 S1/S3	0,0089514	11		0,1074441	455,5		0,3588019	190		0,8177748	169,5		0,8559639	156		0,07888771	217	V C1 S1/S3
	V C1 S2/S3	0,5814411	34		0,6592044	339		0,9476475	159,5		0,4548054	138,5		0,4083153	136,5		1	162	V C1 S2/S3
	V C2 S1/S2	0,1455257	24		0,1829172	289		0,08413609	109,5		0,5594444	180		0,8018094	154		0,4100875	136,5	V C2 S1/S2
	V C2 S1/S3	0,01929769	14		0,1489642	282,5		0,1806171	121		0,1150303	210,5		0,986761	163		0,3155063	131,5	V C2 S1/S3
	V C2 S2/S3	0,1544053	24,5		0,9283003	359		0,5998644	178		0,2372115	198,5		0,774877	171		0,8518869	156	V C2 S2/S3
Réel vs Virtuel (R vs V)	S1 C1	0,135688	57,5		0,0977367	271		0,1702269	120,5		0,3595536	133,5		0,8834994	157		0,4878943	140	S1 C1
	S1 C2	0,9273576	42		0,784128	380,5		0,6538635	176		0,2803454	129,5		0,6548915	176		0,4307024	186,5	S1 C2
	S2 C1	0,2906843	28,5		0,3116699	306,5		0,4235613	137		0,733209	173		0,7958346	170		0,7596431	172	S2 C1
	S2 C2	0,4592885	49		0,4961612	326,5		0,3928462	136		0,7252819	173		0,9865332	163		0,9207104	165,5	S2 C2
	S3 C1	0,5258444	33		0,2487947	298,5		0,5782589	144,5		0,8449915	155,5		0,7447864	151,5		0,4692198	185	S3 C1
	S3 C2	0,3554978	30		0,3068583	307		0,8394884	155,5		0,5905112	179		0,9867016	163		0,5516607	180	S3 C2

TABLE E.1 – Les résultats des tests de Friedman et de Wilcoxon pour le questionnaire Q_c sur la configuration de travail, pour chaque thème

Résultats détaillés par questions

	Le niveau d'interaction était élevé		Vous avez contrôlé le travail avec le robot		Le travail avec le robot vous a imposé des contraintes		La cadence du robot vous a rendu anxieux		Vous vous êtes senti en sécurité		L'interaction avec le robot vous a rendu anxieux		
	Friedman test		Friedman test		Friedman test		Friedman test		Friedman test		Friedman test		
	p	X^2	p	X^2	p	X^2	p	X^2	p	X^2	p	X^2	
Réel + Virtuel	0,00246957	28,76374	0,000399743	33,73401	0,000103112	37,28774	0,2264567	14,1194	0,5516286	9,76514	0,04115704	20,31868	Réel + Virtuel
Réel	0,02294035	13,04721	0,01621233	13,90681	0,001636195	19,375	0,2913107	6,15625	0,754774	2,643312	0,126085	8,600823	Réel
Virtuel	0,002960573	17,98872	0,001455011	19,64758	0,01322005	14,40711	0,06581575	10,35354	0,1916394	7,413793	0,1582887	7,962963	Virtuel

		Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test			
		p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W		
Manuel vs Auto (C1 vs C2)	R S1	0,7511062	44,5	0,002491331	74,5	0,03329663	64,5	1	41	0,6722794	45,5	0,455953	32	R S1	Manuel vs Auto (C1 vs C2)
	R S2	0,1728646	25	0,4142162	50	0,004988229	72	0,3581994	30	0,6383378	35	0,2069902	26	R S2	
	R S3	0,7473612	36,5	0,176369	56	0,01179028	69	0,3161458	29,5	0,9251053	39	0,06506205	20	R S3	
	V S1	0,274202	28	0,001046927	77,5	0,4610597	49	0,3135167	52	0,3064253	52	0,3751629	50,5	V S1	
	V S2	0,7399334	44,5	0,4999549	48,5	0,08475931	60	0,455953	32	0,7078785	36	0,3768089	30,5	V S2	
	V S3	0,8191172	37,5	0,2377335	54	0,06377499	61,5	0,3718326	30,5	0,8874054	38,5	0,3603374	30	V S3	
Scenario S1 vs Scenario S2 vs Scenario S3	R C1 S1/S2	0,8565592	38	0,2092791	54	0,1123695	22,5	0,8569412	43	0,5423571	47,5	0,6819426	45,5	R C1 S1/S2	Scenario S1 vs Scenario S2 vs Scenario S3
	R C1 S1/S3	0,2781276	28	0,6746009	45,5	0,2062569	26	0,9271174	42	0,7743046	44	0,8559417	43	R C1 S1/S3	
	R C1 S2/S3	0,3658533	30	0,5658376	34	0,9261319	42	0,9639956	39,5	0,7390336	36,5	0,7860624	37	R C1 S2/S3	
	R C2 S1/S2	0,04960036	18,5	0,4406265	31,5	0,1635991	25	0,4082817	31	0,778562	37	0,7824685	37	R C2 S1/S2	
	R C2 S1/S3	0,0670298	20	0,3143219	29	0,09167215	21,5	0,2424342	27,5	0,8145186	37,5	0,4073053	31,5	R C2 S1/S3	
	R C2 S2/S3	0,9256666	42	1	40,5	0,6422026	35	0,7616294	37	1	40,5	0,7098016	36	R C2 S2/S3	
	V C1 S1/S2	0,01017647	12	0,27235	53	0,2425595	27	0,2890621	52,5	0,6711911	45,5	0,4890555	48,5	V C1 S1/S2	
	V C1 S1/S3	0,008951404	11	0,4902745	48,5	0,1337797	23,5	0,6746009	45,5	0,5658376	47	0,4926867	48,5	V C1 S1/S3	
	V C1 S2/S3	0,5814411	34	0,6082661	34,5	0,9639177	39,5	0,5219739	33	1	41	0,8915796	38,5	V C1 S2/S3	
	V C2 S1/S2	0,1455257	24	0,1007855	22	1	40,5	0,3811377	30,5	0,3102692	29	0,153374	25	V C2 S1/S2	
	V C2 S1/S3	0,01929769	14	0,07768522	20,5	0,6090879	34,5	0,08792076	21,5	0,4345567	31,5	0,3508292	30	V C2 S1/S3	
	V C2 S2/S3	0,1544053	24,5	1	40,5	0,6094969	34,5	0,3114303	29,5	0,7769138	44	0,7054201	45	V C2 S2/S3	
Réel vs Virtuel (R vs V)	S1 C1	0,135688	57,5	0,9258792	39	0,1388527	57,5	0,2890621	28,5	0,599313	34,5	0,1820398	25,5	S1 C1	Réel vs Virtuel (R vs V)
	S1 C2	0,9273576	42	0,5487927	47,5	0,7744373	37	0,8553161	38	0,6806142	45,5	0,9241711	42	S1 C2	
	S2 C1	0,2906843	28,5	0,6967542	45	0,1433153	57	0,7865132	37	0,6790998	35,5	0,4955372	32,5	S2 C1	
	S2 C2	0,4592885	49	0,963859	39,5	0,2230321	54	1	40	0,6383378	35	0,4855959	32,5	S2 C2	
	S3 C1	0,5258444	33	0,8532253	43	0,1301558	57,5	0,4345567	31,5	0,8482142	38	0,6191337	34,5	S3 C1	
	S3 C2	0,3554978	30	0,892567	38,5	0,3400129	51,5	0,4277918	32	0,8145186	37,5	1	40,5	S3 C2	

	Le robot vous a semblé utile		Vous vous êtes senti utile		Vous vous êtes senti efficace		le robot vous a semblé efficace		L'interaction avec le robot vous a semblé perturbante		La collaboration vous a semblé acceptable		
	Friedman test		Friedman test		Friedman test		Friedman test		Friedman test		Friedman test		
	p	X^2	p	X^2	p	X^2	p	X^2	p	X^2	p	X^2	
Réel + Virtuel	0,000111966	37,0745	0,6792917	8,375858	0,02153358	22,38805	0,00648787	26,00092	0,00376429	27,57115	6,41788E-05	38,50878	Réel + Virtuel
Réel	0,005808624	16,39241	0,5699346	3,858696	0,05028023	11,05603	0,04332125	11,44	0,2506136	6,618257	0,007049135	15,9292	Réel
Virtuel	7,75839E-05	26,31313	0,4702828	4,572193	0,09244124	9,44898	0,01019143	15,04032	0,000295938	23,29876	4,11073E-05	27,72959	Virtuel

		Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test		Wilcoxon test			
		p	W	p	W	p	W	p	W	p	W	p	W		
Manuel vs Auto (C1 vs C2)	R S1	0,01119209	12,5	0,8850238	42,5	0,268607	28	0,1070691	22,5	0,2448769	27,5	0,2018219	26	R S1	Manuel vs Auto (C1 vs C2)
	R S2	0,02139937	15	0,8532253	38	0,06758595	20,5	0,1295616	24,5	0,1369563	23,5	0,0215454	15	R S2	
	R S3	0,1988317	26	0,4533455	49	0,04180682	18,5	0,6711911	35,5	0,0891718	21,5	0,07254541	20,5	R S3	
	V S1	0,1465047	24,5	0,9254523	39	0,4403774	31,5	0,1751144	25,5	0,785152	44	0,4893	32,5	V S1	
	V S2	0,02049304	14,5	0,8903216	38,5	0,1288709	23,5	0,05695974	20	0,0335841	16,5	0,04056538	17,5	V S2	
	V S3	0,4828284	32,5	0,3910783	50,5	0,2359352	27	0,5442237	33,5	0,009328592	11,5	0,01352073	13	V S3	
Scenario S1 vs Scenario S2 vs Scenario S3	R C1 S1/S2	0,7402313	36,5	0,811918	37,5	0,7524039	44,5	0,7752282	37	0,6530951	46	0,8205757	43,5	R C1 S1/S2	Scenario S1 vs Scenario S2 vs Scenario S3
	R C1 S1/S3	0,6133195	34,5	1	40,5	0,4154834	50	0,3866889	30,5	0,6830914	45,5	0,9641307	41,5	R C1 S1/S3	
	R C1 S2/S3	0,8202868	37,5	0,811918	43,5	0,6789302	45,5	0,601283	34,5	0,7530452	36,5	0,8560193	38	R C1 S2/S3	
	R C2 S1/S2	0,7214194	36,5	0,5442237	33,5	0,6722794	45,5	1	41	0,8541209	43	0,8112506	37,5	R C2 S1/S2	
	R C2 S1/S3	1	40	0,4807877	48,5	0,525514	47,5	0,7406762	44,5	0,8860629	42,5	0,5961899	34,5	R C2 S1/S3	
	R C2 S2/S3	0,8506964	43	0,3143219	52	0,9610007	41,5	0,8092049	43,5	0,8531431	38	0,7696509	37	R C2 S2/S3	
	V C1 S1/S2	0,3824726	50,5	0,6474114	46	0,7144479	45	0,7025575	45	0,1242307	58	0,2601326	53,5	V C1 S1/S2	
	V C1 S1/S3	0,7018718	36	0,4655367	49	0,6484984	46	0,4290837	31,5	0,1234156	58	0,2374773	54	V C1 S1/S3	
	V C1 S2/S3	0,1876304	25,5	0,7155004	45	0,9638196	41,5	0,1705929	25,5	0,8177233	37,5	1	40,5	V C1 S2/S3	
	V C2 S1/S2	0,8506964	43	0,6119242	46,5	0,7468122	36,5	1	40,5	0,1433153	24	1	40,5	V C2 S1/S2	
	V C2 S1/S3	0,7779324	44	0,08577666	60	1	41	1	40,5	0,1683118	25,5	0,8092049	37,5	V C2 S1/S3	
	V C2 S2/S3	0,9623126	41,5	0,1544053	56,5	0,7098016	45	1	40,5	0,810236	43,5	0,8092049	37,5	V C2 S2/S3	
Réel vs Virtuel (R vs V)	S1 C1	0,5521312	33,5	0,5487927	33,5	0,9638786	41,5	0,8170142	37,5	0,2448769	27,5	0,2018219	26	S1 C1	Réel vs Virtuel (R vs V)
	S1 C2	0,735809	36,5	0,3089032	29	0,612524	46,5	1	41	0,2156017	54,5	0,8506964	43	S1 C2	
	S2 C1	0,7516277	44,5	0,8170142	43,5	1	40	0,6862793	45	0,8200934	43,5	0,8205757	43,5	S2 C1	
	S2 C2	0,8092049	43,5	0,8540402	43	1	41	1	40,5	0,710749	36	0,5658376	47	S2 C2	
	S3 C1	0,6511724	35	0,7447215	44,5	0,7174244	36	1	40,5	0,4418671	49,5	0,68358	45,5	S3 C1	
	S3 C2	0,9628995	41,5	0,3587358	51	0,7752282	44	0,8092049	37,5	0,8399521	43	0,4965976	48	S3 C2	

TABLE E.2 – Les résultats des tests de Friedman et de Wilcoxon pour le questionnaire Q_c sur la configuration de travail, pour chaque question

Résultats globaux par thèmes	Familiarisation		Sécurité		Acceptabilité						
	Wilcoxon test (Sr/Sv)		Wilcoxon test (Sr/Sv)		Wilcoxon test (Sr/Sv)						
	p	W	p	W	p	W					
	0,1730878	202,5	0,1394691	523,5	0,8396315	38					
Résultats détaillés par questions	Vous avez eu suffisamment de temps de familiarisation		Vous étiez à l'aise avec les opérations		L'apparence du robot vous a paru sécurisante		L'interaction avec le robot était à une distance adaptée				
	Wilcoxon test (Sr/Sv)		Wilcoxon test (Sr/Sv)		Wilcoxon test (Sr/Sv)		Wilcoxon test (Sr/Sv)				
	p	W	p	W	p	W	p	W			
	0,34	51	0,40	50	0,22	27	0,20	26,5			
	La vitesse du robot était adaptée		Vous vous êtes senti en sécurité		La collaboration était acceptable						
	Wilcoxon test (Sr/Sv)		Wilcoxon test (Sr/Sv)		Wilcoxon test (Sr/Sv)						
	p	W	p	W	p	W					
	0,29	52,5	0,10	23	0,84	38					

TABLE E.3 – Les résultats des tests de Wilcoxon pour le questionnaire Q_s, pour chaque thème et chaque question

			2-way Anova	
			p	F
Rythme cardiaque	Réel	S1/S2/S3	3,1712E-08	24,51124
		C1/C2	0,03797961	4,780391
		int. S/C	0,03414669	3,606224
	Virtuel	S1/S2/S3	1,125E-11	42,5618
		C1/C2	0,8271988	0,04862327
		int. S/C	0,6161492	0,4888041
	Manuel	R/V	0,00153071	12,53413
		S1/S2/S3	2,6352E-13	53,21151
		int. RV/S	0,3091966	1,200677
	Auto	R/V	0,00800375	8,25078
		S1/S2/S3	1,8221E-15	69,9124
		int. RV/S	0,8167233	0,2032452
	S1	R/V	0,03291455	5,07645
		C1/C2	0,9339946	0,00699326
		int. RV/C	0,5750499	0,322383
	S2	R/V	0,0103545	7,639412
		C1/C2	0,1498421	2,202141
		int. RV/C	0,00646535	8,768742
	S3	R/V	0,00981517	7,765196
		C1/C2	0,09956288	2,917052
		int. RV/C	0,8251676	0,0497931

			2-way Anova	
			p	F
Conductance de la peau	Réel	S1/S2/S3	2,5052E-05	13,07875
		C1/C2	0,3131187	1,058123
		int. S/C	0,2357105	1,486068
	Virtuel	S1/S2/S3	0,7190442	0,3319334
		C1/C2	0,378118	0,8040334
		int. S/C	0,2723153	1,333884
	Manuel	R/V	2,4124E-05	26,27307
		S1/S2/S3	0,00015347	10,44722
		int. RV/S	0,00101398	7,894252
	Auto	R/V	2,4979E-06	35,93269
		S1/S2/S3	0,00444558	6,021202
		int. RV/S	0,00855784	5,224667
	S1	R/V	0,1047584	2,82543
		C1/C2	0,5928411	0,2931142
		int. RV/C	0,02271799	5,865281
	S2	R/V	1,8325E-05	27,3546
		C1/C2	0,9685162	0,00158811
		int. RV/C	0,4075848	0,7086016
	S3	R/V	1,059E-08	67,57291
		C1/C2	0,8248298	0,04998904
		int. RV/C	0,2848132	1,192645

TABLE E.4 – Les résultats des ANOVAs pour les données liées aux mesures physiologiques

Étude des Conditions d'Acceptabilité de la Collaboration Homme-Robot en utilisant la Réalité Virtuelle

RÉSUMÉ :

Que ce soit dans un contexte industriel ou quotidien, les robots deviennent de plus en plus présents dans notre environnement et sont désormais capables d'interagir avec des humains. Dans les milieux industriels, des robots viennent notamment assister les opérateurs des chaînes d'assemblage pour des tâches fatigantes et dangereuses. Robots et opérateurs sont alors amenés à partager le même espace physique (coprésence) et à effectuer des tâches en commun (collaboration). Alors que la sécurité des humains à proximité des robots doit être garantie à tout instant, il convient également de déterminer si le travail collaboratif est accepté par les opérateurs, en termes d'utilisabilité et d'utilité.

La première problématique de la thèse consiste à déterminer quelles sont les composantes importantes rentrant en jeu dans l'acceptabilité de la collaboration homme-robot, du point de vue des opérateurs. Différents facteurs peuvent influencer cette acceptabilité : l'apparence des robots et leurs mouvements, la distance de sécurité ou encore le mode d'interaction avec le robot.

Afin d'étudier le maximum de facteurs, nous proposons d'utiliser la réalité virtuelle pour mener des tests utilisateurs en environnement virtuel. Nous utilisons des questionnaires pour recueillir les impressions subjectives des opérateurs et des mesures physiologiques pour estimer leur état affectif (stress, effort). La deuxième problématique de la thèse consiste à déterminer si une méthodologie utilisant la réalité virtuelle est pertinente pour cette évaluation : les résultats issus des tests en environnement virtuel rendent-ils bien compte de la situation réelle ?

Pour répondre aux problématiques de la thèse, trois cas d'étude ont été mis en place et quatre expérimentations ont été menées. Deux de ces expérimentations ont été reproduites à la fois en environnements réel et virtuel afin d'évaluer la pertinence des résultats issus de la situation virtuelle par rapport à la situation réelle.

Mots-clés : collaboration homme-robot, réalité virtuelle, acceptabilité, facteurs humains, interaction homme-robot, immersion, interaction

Assessing the Acceptability of Human-Robot Collaboration using Virtual Reality

ABSTRACT:

Either in the context of the industry or of the everyday life, robots are becoming more and more present in our environment and are nowadays able to interact with humans. In industrial environments, robots now assist operators on the assembly lines for difficult and dangerous tasks. Then, robots and operators need to share the same physical space (copresence) and to manage common tasks (collaboration). On the one side, the safety of humans working near robots has to be guaranteed at all time. On the other hand, it is necessary to determine if such a collaborative work is accepted by the operators, in terms of usability and utility.

The first problematic of the thesis consists in determining the important criteria that play a role in the acceptability, from the operators' point of view. Different factors can influence this acceptability: robot appearance, robot movements, safety distance or interaction modes with the robot.

In order to study as many factors as possible, we intend to use virtual reality to perform user studies in virtual environments. We are using questionnaires to gather subjective impressions from operators and physiological measures to estimate their affective states (stress, effort). The second problematic of the thesis consists in determining if a methodology using virtual reality is relevant for this evaluation: can the results from studies in virtual environments be reproducible in equivalent physical situations?

In order to answer the problematics of the thesis, three use cases have been implemented and four studies have been performed. Two of those studies rely on a physical situation and its virtual reality counterpart in order to evaluate the relevance of the results of the virtual situation compared to the real situation.

Keywords: human-robot collaboration, virtual reality, acceptability, human factors, human-robot interaction, immersion, interaction

MINES ParisTech

ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY