Université Polytechnique HAUTS-DE-FRANCE

Thèse de doctorat

Pour obtenir le grade de Docteur de

l'UNIVERSITÉ POLYTECHNIQUE HAUTS-DE-FRANCE

Spécialité :

Automatique

Présentée et soutenue par Lydia, HABIB

Le 19/12/2019, à Valenciennes

Ecole doctorale :

Sciences Pour l'Ingénieur (ED SPI 072)

Equipe de recherche, Laboratoire :

Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines (LAMIH – UMR 8201)

Niveaux d'automatisation adaptables pour une coopération homme-robots

JURY

Président du jury
- Pudlo, Philippe. Pr, Université Polytechnique Hauts-de-France.

Rapporteurs
- Berruet, Pascal. Pr, Université de Bretagne Sud.
- Bril-El Haouzi, Hind. Pr, Université de Lorraine.

Examinatrice
- Babel, Marie. MCF-Hdr, Institut National des Sciences Appliquées.

Directeur de thèse
- Millot, Patrick. Pr, Université Polytechnique Hauts-de-France.

Co-encadrante : Pacaux-Lemoine, Marie-Pierre. Dr, Université Polytechnique Hauts-de-France.

Membre invité
- Foucrier, Laurent. Commandant, COMSIC du NORD.

Je dédie ce travail à mes chers parents.

ABSTRACT

We have witnessed a considerable interest in service robotics over the years. The robots are increasingly used to serve humans in various application fields. However, due to their limited capacity, the robots cannot meet all human expectations and the dynamic environment requirements. Robots and humans must therefore work as a team in a complementary way to benefit from each other's skills while overcoming their weakness.

In this research, we apply the principles of human-machine cooperation to define adaptable levels of automation to ensure human-robots cooperation. The human and the robot are represented with the same cognitive model characterizing their respective skills and abilities to perform a task but also to cooperate. The possible interactions between the human and the robot are identified at several abstraction levels of the task accomplishment. The issues of task and function allocation, as well as authority management, are identified and used to meet the cooperation requirements.

In addition to the theoretical aspects, we have implemented human-robot systems with different levels of automation in two contexts: a system consisting of a human and two mobile robots for crisis management and a system composed of a human, a mobile robot and a control system via the human "thoughts" in the context of disability. Experimental studies are conducted with these two systems. These studies validated the proposed systems and then assessed the adaptation of levels of automation to support cooperation.

Keywords: adaptable levels of automation, human-robot(s) cooperation, human factors, human-robot(s) system, crisis management, telepresence.

RESUME

Nous avons constaté un intérêt considérable pour la robotique de service au fil des années. Les robots sont de plus en plus utilisés pour rendre service aux humains dans différents domaines d'application. Néanmoins, compte tenu de leur capacité limitée, les robots ne peuvent pas répondre à toutes les attentes des humains et aux exigences de l'environnement dynamique. Les robots et les humains doivent donc travailler en équipe de façon complémentaire pour bénéficier des compétences de chacun tout en palliant leurs faiblesses.

Dans cette recherche, nous appliquons les principes de la coopération homme-machine pour définir des niveaux d'automatisation adaptables permettant d'assurer une coopération homme-robots. L'humain et le robot sont représentés sous forme d'un même modèle cognitif caractérisant leurs compétences et capacités respectives à réaliser une tâche mais aussi à coopérer. Les interactions possibles entre l'humain et le robot sont identifiées à plusieurs niveaux d'abstraction de réalisation de la tâche. Les questions de l'allocation de tâches et de fonctions, ainsi que de gestion d'autorité sont identifiées et utilisées pour répondre aux besoins de la coopération.

Outre les aspects théoriques, nous avons implémenté des systèmes homme-robots avec différents niveaux d'automatisation dans deux contextes : un système composé d'un humain et de deux robots mobiles destiné à la gestion de crise et un système composé d'un humain, d'un robot mobile et d'un système de contrôle via les « pensées » de l'humain dans le cadre du handicap. Des études expérimentales sont menées avec ces deux systèmes. Ces études ont permis de valider les systèmes proposés, puis d'évaluer l'adaptation des niveaux d'automatisation pour soutenir la coopération.

Mots clés : niveaux d'automatisation adaptables, coopération homme-robot(s), facteurs humains, système homme-robot(s), gestion de crise, téléprésence.

REMERCIEMENTS

Ce manuscrit est le fruit d'années de travail persévérant, souvent accompagné de doute et de remise en question. De nombreuses personnes ont contribué de loin ou de près à l'aboutissement de cette thèse. J'aimerais donc leur adresser par quelques mots simples mon sentiment de gratitude le plus sincère.

Tout d'abord, j'aimerais remercier le directeur du laboratoire LAMIH, *Thierry-Marie GUERRA* pour son accueil et sa sympathie.

Ensuite, je tiens à exprimer mes profonds remerciements à ma co-encadrante *Marie-Pierre Pacaux-Lemoine* et mon directeur *Patrick Millot* pour leur grand dévouement, leur compréhension et leur bienveillance tout au long de ces années de thèse.

Un immense merci à mes rapporteurs *Pascal BERRUET* et *Hind BRIL-El HAOUZI* pour avoir accepté de réaliser une lecture attentive de ce manuscrit. Je remercie également très chaleureusement *Philippe PUDLO, Marie BABEL* et *Laurent FOUCRIER* pour avoir participé à mon jury de thèse.

Comme je tiens à témoigner ma gratitude envers *Anh-Tu Nguyen, Jimmy LAUBER, Serge Debernard, Chouki SENTOUH, Mohamed DJEMAI, Abdelghani BEKRAR* et *Sébastien DELPRAT* pour leur aide précieuse qui m'a permis de mener à bien mes enseignements. Ce fut une expérience très enrichissante !

Mes remerciements vont également à tout le personnel du LAMIH pour leurs services et l'atmosphère agréable qu'ils ont créée pendant toute ma thèse.

Je me dois également de remercier mes amis, *Hanane*, *Zeineb*, *Amina*, *Gwen*, *Mourad*, *Salvatore*, *Amir*, *Ben*, *Quentin*, *Romain*, *Marko*, *Ayoub*, *Walid*, *Yunfei*, *Mathias* et *Jérémie* pour leur soutien et les agréables moments passés avec eux.

Avant de terminer, je tiens à remercier plus particulièrement mes collègues de bureau *Viethuan* et *Ouazna* pour leur présence et leurs encouragements permanents. Merci *Viet* et merci *Ouaznati* ^_^.

Je termine par adresser mes sincères remerciements à mon papa *Djamel*, ma maman *Hakima*, ma grande sœur *Lilia*, mes deux petits frères *Redouane* et *Rassim*, ma meilleure amie *Taous*, ma cousine *Samira* et son mari *Abbes*, ma tata *Fifa* et sa fille *Fairouz* d'avoir répondu présent durant les moments de stress et de doute.

TABLE DES MATIÈRES

ABSTRACT V

RESUME VII

REMERCIEMENTS IX

LISTE DES TABLEAUX XVII

LISTE DES FIGURES XIX

LISTE DES ABREVIATIONS XXIII

INTRODUCTION GENERALE XXV

1 VERS UNE COOPERATION HOMME-ROBOT 31

1.1 INTRODUCTION 31

1.2 LA ROBOTIQUE 31

1.2.1 Brève histoire de la robotique 32

1.2.2 La robotique au service de l'humain 34

1.2.3 Les humains et les robots mobiles de service 36

1.3 LIMITES DE L'AUTOMATISATION EN ROBOTIQUE MOBILE 37

1.3.1 Fiabilité et capacité du robot 37

1.3.2 Transparence et retour d'informations 38

1.4 LES FACTEURS HUMAINS ET L'AUTOMATISATION DANS UN SYSTEME HOMME-ROBOT 39

1.4.1 Conscience de la situation 40

1.4.2 Charge de travail 41

1.5 CONCEPTION ET AUTOMATISATION D'UN SYSTEME HOMME-MACHINE 43

1.5.1 Conception centrée sur la machine 43

1.5.2 Automatisation centrée sur l'humain 44

1.6 ANALYSE DE L'ACTIVITE ET DU COMPORTEMENT HUMAIN 47

1.6.1 Modèle de Rasmussen 48

1.6.2 Modèle de Michon 49

1.7 ALLOCATION DE TACHES ET DE FONCTIONS 50

1.8 CONCLUSION 53

2 LA COOPERATION HOMME-MACHINE, CADRE THEORIQUE 55

2.1 INTRODUCTION 55

2.2 NIVEAUX D'AUTOMATISATION 55

2.2.1 Concept et définition des niveaux d'automatisation 56

2.2.2 Taxonomies des niveaux d'automatisation 57

2.2.2.1 Les niveaux d'automatisation dans différents domaines d'application 57

2.2.2.2 Les niveaux d'automatisation en robotique 62

2.2.2.3 Synthèse 64

2.2.3 Niveaux d'automatisation adaptatifs ou adaptables 65

2.2.3.1 Niveaux d'automatisation adaptatifs 66

2.2.3.2 Niveaux d'automatisation adaptables 68

2.2.3.3 Synthèse 68

2.3 COOPERATION HOMME-MACHINE 69

2.3.1 Modèle de l'agent coopératif 70

2.3.2 Espace de travail commun 72

2.3.3 Modèle de la coopération homme-machine 73

2.4 ORGANISATION DE LA COOPERATION 75

2.4.1 Organisation fonctionnelle : formes de Schmidt 75

2.4.1.1 Forme augmentative 75

2.4.1.2 Forme intégrative 76

2.4.1.3 Forme confrontative 76

2.4.2 Organisation structurelle 76

2.4.2.1 Structure verticale 76

2.4.2.2 Structure horizontale 77

2.4.3 Organisation coopérative multi-niveau 77

2.5 CONCLUSION 78

3 PROPOSITION D'UNE METHODOLOGIE DE CONCEPTION DE NIVEAUX D'AUTOMATISATION 81

3.1 INTRODUCTION 81

3.2 DE LA COOPERATION HOMME-MACHINE AUX NIVEAUX D'AUTOMATISATION 82

3.2.1 Interactions lors d'une coopération homme-robot 82

3.2.2 Cas d'usage 85

3.3 COOPERATION EN ROBOTIQUE MOBILE DE SERVICE 89

3.3.1 Savoir-faire de l'humain et du robot 89

3.3.2 Savoir-coopérer de l'humain et du robot 90

3.3.3 Modèle du comportement humain et de son savoir-coopérer 92

3.3.4 Allocation de fonctions 93

3.4 DESCRIPTION DES NIVEAUX D'AUTOMATISATION 94

3.4.1 Intérêt de la commande prédictive à base de modèle 96

3.4.1.1 Modèle du robot 97

3.4.1.2 Synthèse de la loi de commande prédictive pour le robot 99

3.4.1.2.1 Stratégie de la commande MPC appliquée au robot 99

3.4.1.2.2 Formulation de la fonction coût 100

3.4.1.3 Résultat 103

3.5 CONCLUSION 104

4 IMPLEMENTATION ET EVALUATION DE LA COOPERATION HOMME-ROBOTS DANS LE CADRE DE LA GESTION DE CRISE 105

4.1 INTRODUCTION 105

4.2 IMPLEMENTATION 108

4.2.1 Plateforme expérimentale 108

4.2.1.1 Robots mobiles 109

4.2.1.2 Implémentation des niveaux d'automatisation 111

4.2.1.2.1 Détection d'obstacles 111

4.2.1.2.2 LoA autonome 112

4.2.1.2.3 LoA semi-autonome 113

4.2.1.2.4 LoA manuel 114

4.2.1.3 Poste de contrôle/commande 115

4.2.1.4 Communications 119

4.3 METHODE D'EVALUATION 121

4.3.1 Mission 121

4.3.2 Participants 123

4.3.3 Protocole 123

4.3.4 Mesures 124

4.3.4.1 Mesures objectives 124

4.3.4.2 Mesures subjectives 125

4.4 RESULTATS 126

4.4.1 Résultats basés sur les mesures objectives 126

4.4.2 Résultats basés sur les mesures subjectives 129

4.4.3 Discussion 135

4.4.4 Conclusions et perspectives 137

4.5 CONCLUSION 138

5 IMPLEMENTATION ET EVALUATION DE LA COOPERATION HOMME-ROBOT DANS LE CADRE DU HANDICAP 139

5.1 INTRODUCTION 139

5.2 IMPLEMENTATION 142

5.2.1 Plateforme expérimentale 142

5.2.1.1 Poste de contrôle/commande 143

5.2.1.2 Implémentation des niveaux d'automatisation 145

5.3 ÉVALUATION 147

5.3.1 Étude préliminaire 148

5.3.1.1 Méthode 148

5.3.1.1.1 Mission 148

5.3.1.1.2 Participants 148

5.3.1.1.3 Protocole 148

5.3.1.1.4 Mesures 149

5.3.1.1.4.1 Mesures objectives 149

5.3.1.1.4.2 Mesures subjectives 149

5.3.1.2 Résultats 150

5.3.1.2.1 Résultats basés sur les mesures objectives 150
5.3.1.2.2 Résultats basés sur les mesures subjectives 151
5.3.1.3 Discussion 152
5.3.1.4 Conclusions et perspectives 153
5.3.2 Étude complémentaire 153
5.3.2.1 Méthode 153
5.3.2.1.1 Mission 153
5.3.2.1.2 Participants 154
5.3.2.1.3 Protocole 154
5.3.2.1.4 Mesures 155
5.3.2.1.4.1 Mesures objectives 155
5.3.2.1.4.2 Mesures subjectives 156
5.3.2.2 Résultats 156
5.3.2.2.1 Précision du BCI 156
5.3.2.2.2 Résultats basés sur les mesures objectives 157
5.3.2.2.3 Résultats basés sur les mesures subjectives 160
5.3.2.3 Discussion 162
5.3.2.4 Conclusion et perspectives 164
5.4 CONCLUSION 165
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES 167
ANNEXES 171
REFERENCES 191

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 2-1. QUELQUES DEFINITIONS DES NIVEAUX D'AUTOMATISATION/D'AUTONOMIE (LOA) 57
TABLEAU 2-2 QUELQUES NIVEAUX D'AUTOMATISATION/D'AUTONOMIE (LOA) PRESENTES DANS LA LITTERATURE 58
TABLEAU 2-3 QUELQUES TAXONOMIES DE NIVEAUX D'AUTOMATISATION/D'AUTONOMIE PROPOSES DANS LA LITTERATURE ROBOTIQUE..... 63
TABLEAU 3-1 LES COMBINAISONS DES FONCTIONS DU SF ET SC DE L'HUMAIN ET DU ROBOT IDENTIFIEES POUR LE CAS D'USAGE 88
TABLEAU 3-2 EXEMPLE DE DEFINITION DES FONCTION DU SF ET SC DE L'HUMAIN ET DU ROBOT (*EN ITALIQUE*) SUIVANT LES NIVEAUX D'ABSTRACTION (PACAUX-LEMOINE ET *AL*., 2011)..... 91
TABLEAU 3-3 INTERACTIONS ENTRE L'OPERATEUR HUMAIN (OH) ET LE ROBOT POUR CHAQUE LOA (LOA1, LOA2 ET LOA3). « 1 » LA FONCTION PEUT ETRE ALLOUEE A L'AGENT SINON, « 0 95
TABLEAU 4 CORRELATIONS SIGNIFICATIVES ENTRE LES REPONSES DES PARTICIPANTS CONCERNANT LEURS SF ET SC ET LEURS PERFORMANCES (TEMPS DE NEGLIGENCE (NT), TEMPS DE L'EXECUTION (T) ET CONSCIENCE DE LA SITUATION (SA))..... 134
TABLEAU 5-1 CHAQUE PARTIE DU TABLEAU PRESENTE POUR CHAQUE AGENT (HUMAIN ET ROBOT) SON SF (RECTANGLES VIOLET ET BLEU RESPECTIVEMENT) ET SON SC (RECTANGLES GRIS CLAIR). SI L'AGENT A LA CAPACITE D'EFFECTUER UNE SOUS-FONCTION, « 1 » EST ECRIT DANS LE RECTANGLE SINON « 0 ». L'ETC SE CONCENTRE ICI SUR LE RETOUR VISUEL DU BCI (FLECHES ET BARRE GRISE CENTRALE)..... 147
TABLEAU 5-2 QUATRE CONDITIONS EXPERIMENTALES ONT ETE TESTEES : AVEC OU SANS LE RETOUR HAPTIQUE EMULE EN COMBINAISON AVEC OU SANS LE CONTROLE PARTAGE..... 149

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1-1 LE ROBOT UNIMATE 32
FIGURE 1-2 LE ROBOT SHAKEY 33
FIGURE 1-3 LE ROBOT HILARE 34
FIGURE 1-4 TYPES DE ROBOTS DE SERVICE. (A) ROBOT HUMANOÏDE. (B) ROBOT MOBILE. (C) ROBOT VOLANT. (D) ROBOT SOUS-MARIN. (E) ROBOT EXOSQUELETTE. (F) ROBOT MANIPULATEUR. 35
FIGURE 1-5 : ENVIRONNEMENT DU SYSTEME HOMME-MACHINE (BOY, 2011) 45
FIGURE 1-6 : APPROCHE CENTREE SUR L'HUMAIN (MILLOT, 2014A) 47
FIGURE 1-7 : MODELE DU COMPORTEMENT HUMAIN PROPOSE PAR RASMUSSEN TRADUIT DE (RASMUSSEN, 1983) 49
FIGURE 1-8 LA REPARTITION HIERARCHIQUE DE L'ACTIVITE SELON MICHON (MICHON, 1985) 49
FIGURE 1-9 MABA-MABA (FITTS ET AL., 1951) 52
FIGURE 2-1 NIVEAUX D'AUTOMATISATION PROPOSES PAR (SHERIDAN & VERPLANK, 1978) 59
FIGURE 2-2 DEFINITIONS DU NIVEAU D'AUTOMATISATION (LOA) DE DEUX SYSTEMES EN L'EVALUANT POUR CHAQUE FONCTION PRINCIPALE D'APRES (PARASURAMAN ET *AL.*, 2000) 61
FIGURE 2-3- MODELE D'AGENT COOPERATIF (MILLOT & PACAUX-LEMOINE, 2013) 71
FIGURE 2-4 ETC UTILISE POUR LA COOPERATION EN ROBOTIQUE DE RECONNAISSANCE (PACAUX-LEMOINE ET *AL.*, 2011) 73
FIGURE 2-5 MODELE DE LA COOPERATION HOMME-MACHINE (PACAUX-LEMOINE, 2014) 74
FIGURE 2-6 STRUCTURE VERTICALE DE LA COOPERATION HOMME-MACHINE 76
FIGURE 2-7 STRUCTURE HORIZONTALE DE LA COOPERATION HOMME-MACHINE 77
FIGURE 2-8 ORGANISATION COOPERATIVE MULTI-NIVEAU 78
FIGURE 3-1 MODELE DE COOPERATION UTILISE POUR DEFINIR LES DIFFERENTES ALLOCATIONS POSSIBLES DE FONCTIONS ENTRE L'HUMAIN ET LE ROBOT (PAR LA SUITE CHAQUE FONCTION DU SF ET DU SC SERA REDUITE EN 0 ET 1) 83
FIGURE 3-2 ALLOCATIONS POSSIBLES DES FONCTIONS CONSTITUANT LE SF DE L'HUMAIN ET CELUI DU ROBOT 84
FIGURE 3-3 ALLOCATIONS POSSIBLES DES FONCTIONS CONSTITUANT LE SC DE L'HUMAIN ET CELUI DU ROBOT A CHAQUE FONCTION DU SF 84
FIGURE 3-4 DECOMPOSITION DE LA TACHE PRINCIPALE (MISSION) EN SOUS-TACHES DANS LE CADRE DE LA ROBOTIQUE MOBILE DE SERVICE 89
FIGURE 3-5 MODELE DU COMPORTEMENT HUMAIN BASE SUR SON SC (HABIB, PACAUX-LEMOINE, & MILLOT, 2017) ADAPTE DU MODELE DE (RASMUSSEN, 1983) 92
FIGURE 3-6 PRINCIPE FONDAMENTAL DE LA COMMANDE MPC 97
FIGURE 3-7 MODELE CINEMATIQUE DU ROBOT. « US » CAPTEUR A ULTRASONS 98
FIGURE 3-8 SCHEMA BLOC DE LA COMMANDE MPC, P_{ref} (POSITIONS DE REFERENCE), P_{pre} (POSITIONS PREDITES), ω (COMMANDES), $\omega^*(k)$ (LE PREMIER ELEMENT DE LA SEQUENCE DE COMMANDES OPTIMALE) ET $P(k)$ (LA POSITION DU ROBOT A L'INSTANT k) 99
FIGURE 3-9 ANALOGIE ENTRE LES FONCTIONS COUTS UTILISEES DANS LE MPC ET LE SF DU ROBOT AU LOA AUTONOME. CHAQUE ENSEMBLE DES QUATRE RECTANGLES CONTENANT DES 0 ET 1 REPRESENTE LES QUATRE FONCTIONS DU SF 101
FIGURE 3-10 TRAJECTOIRE DU ROBOT POUR ATTEINDRE UN OBJECTIF ($P_{but} = \{0.5, 0.6\}$) TOUT EN EVITANT UN OBSTACLE ($P_{obs} = \{0.27, 0.28\}$). LE RAYON DU CERCLE REPRESENTE LA DISTANCE DE SECURITE d_{sec} 103

FIGURE 4-1 GESTION DE CRISE ET NIVEAUX DE COOPERATION 106
FIGURE 4-2 MODELE DE COOPERATION ENTRE L'HUMAIN ET LES ROBOTS, EN FONCTION DE LEURS SAVOIR-FAIRE ET SAVOIR-COOPERER 107
FIGURE 4-3 LE MATERIEL UTILISE POUR CREER LE SYSTEME HOMME-ROBOTS. LA COMMUNICATION ENTRE L'ORDINATEUR ET LES ROBOTS SE FAIT VIA DES MODULES XBEE 108
FIGURE 4-4 IDENTIFICATION DES SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES POUR LE DEVELOPPEMENT DES DIFFERENTES FONCTIONS DU SF ET SC PAR LE ROBOT 109
FIGURE 4-5 LES DIFFERENTS COMPOSANTS DES ROBOTS MOBILES UTILISES POUR L'IMPLEMENTATION 111
FIGURE 4-6 LOGIGRAMME DU PROGRAMME PRINCIPAL DE DETECTION D'OBSTACLES 112
FIGURE 4-7 LOGIGRAMME DU PROGRAMME PRINCIPAL DU LOA « SEMI-AUTONOME » 113
FIGURE 4-8 LOGIGRAMMES DES PARTIES DEPLACER ROBOT ET B DU PROGRAMME PRINCIPAL 114
FIGURE 4-9 LOGIGRAMME DU LOA MANUEL 115
FIGURE 4-10 DIAGRAMME DE CLASSES DU PROGRAMME IMPLEMENTE DANS L'ORDINATEUR 116
FIGURE 4-11 INTERFACE DE CONTROLE 117
FIGURE 4-12 INTERFACE TACTIQUE 118
FIGURE 4-13 FENETRE DE RECALAGE 119
FIGURE 4-14 COMMUNICATION ENTRE LES DIFFERENTES COMPOSANTES MATERIELLES ET LOGICIELLES DU SYSTEME HOMME-ROBOTS 120
FIGURE 4-15 RECEPTION DES DONNEES PAR L'ORDINATEUR (SOUS VISUAL C++) EN FONCTION DE L'ADRESSE SOURCE (NUMROBOT). LES DONNEES SONT RECUPEREES A PARTIR DU 7EME OCTET (DATA[7]). LES OCTETS PRECEDENTS SONT RESERVES POUR L'ENTETE (INFORMATIONS SUPPLEMENTAIRES AJOUTEES AU MESSAGE) 121
FIGURE 4-16 ENVIRONNEMENT EXPERIMENTAL 122
FIGURE 4-17 PERFORMANCE DANS LA MISSION EN FONCTION DES CONDITIONS EXPERIMENTALES .. 126
FIGURE 4-18 TEMPS DE NEGLIGENCE EN FONCTION DES CONDITIONS EXPERIMENTALES 127
FIGURE 4-19 RESPECT DES LOA PROPOSES EN FONCTION DES CONDITIONS EXPERIMENTALES 128
FIGURE 4-20 RESPECT DES LOA PROPOSES 129
FIGURE 4-21 DESCRIPTEURS DE LA CHARGE DE TRAVAIL PONDEREES EN FONCTION DES CONDITIONS EXOERIMENTALES 130
FIGURE 4-22 CHARGE DE TRAVAIL PONDEREE EN FONCTION DES CONDITIONS EXPERIMENTALES 130
FIGURE 4-23 CONSCIENCE DE LA SITUATION EN FONCTION DES CONDITIONS EXPERIMENTALES 131
FIGURE 4-24 RESPECT DES LOA PROPOSES EN FONCTION DES REPONSES A LA QUESTION Q1 132
FIGURE 4-25 RESPECT DES LOA PROPOSES EN FONCTION DES REPONSES A LA QUSTION Q2 133
FIGURE 5-1 SYSTEME HOMME-ROBOT BASE SUR LE BCI 140
FIGURE 5-2 MODELE DE COOPERATION ENTRE L'HUMAIN, LE ROBOT ET LE BCI EN FONCTION DE LEUR SAVOIR-FAIRE (SF) ET SAVOIR-COOPERER (SC). LES AGENTS UTILISENT DES ESPACES DE TRAVAIL COMMUNS : HUMAIN ET LE BCI (1), HUMAIN ET ROBOT (2) 141
FIGURE 5-3 LE MATERIEL UTILISE POUR CREER LE SYSTEME HOMME-ROBOT. LA COMMUNICATION ENTRE L'ORDINATEUR ET LE ROBOT SE FAIT VIA DES MODULES XBEE 143
FIGURE 5-4 SCHEMA DE CONCEPTION D'UN SYSTEME BCI POUR LE CONTROLE A DISTANCE D'UN ROBOT MOBILE 144
FIGURE 5-5 ETC : RETOUR VIDEO DE L'ENVIRONNEMENT DANS LEQUEL LE ROBOT EVOLUE ET RETOUR VISUEL DU BCI 144
FIGURE 5-6 RETOUR VISUEL DU BCI AVEC LE RETOUR HAPTIQUE EMULE 146
FIGURE 5-7 ENVIRONNEMENT EXPERIMENTAL 148
FIGURE 5-8 NOMBRE DE COMMANDES ENVOYE PAR LE BCI 150
FIGURE 5-9 TEMPS DE REALISATION DE LA MISSION 151

FIGURE 5-10 ENVIRONNEMENT EXPERIMENTAL 154
FIGURE 5-11 AMELIORATION DE L'ETC. L'UTILISATEUR EST INFORME DE L'ORIENTATION ET DE LA PROXIMITE DE L'OBSTACLE GRACE A L'AFFICHAGE RADAR SUPERPOSE SUR LE RETOUR VISUEL DU ROBOT. 155
FIGURE 5-12 LES QUATRE SECTIONS DE LA TRAJECTOIRE (SECTIONS ORANGE ET VERTE DE 1 A 4) ET EXEMPLE DE BOUCLE (LOOP EN NOIR) 156
FIGURE 5-13 PRECISION DU BCI DE TOUTES LES SESSIONS D'ENTRAINEMENT EN LIGNE (MOYENNES %) DE CHAQUE PARTICIPANT AVANT SA PARTICIPATION AUX EXPERIMENTATIONS AVEC LE ROBOT. 157
FIGURE 5-14 NOMBRE D'ARRETS ET D'EVITEMENTS D'OBSTACLES PAR LE ROBOT 158
FIGURE 5-15 NOMBRE DE COMMANDES ENVOYEES PAR LE BCI 158
FIGURE 5-16 NOMBRE DE COLLISIONS 159
FIGURE 5-17 NOMBRE DE BOUCLES DE LA TRAJECTOIRE REALISEE 159
FIGURE 5-18 NOMBRE DE SECTIONS CORRECTES DE LA TRAJECTOIRE REALISEE 160
FIGURE 5-19 PERFORMANCE GLOBALE DU SYSTEME HOMME-ROBOT-BCI 160
FIGURE 5-20 SCORES PONDERES DES DESCRIPTEURS TLX POUR CHAQUE CONDITION EXPERIMENTALE. POUR TOUS LES DESCRIPTEURS (Y COMPRIS LA PERFORMANCE), LE SCORE LE PLUS FAIBLE EST LE MEILLEUR 161
FIGURE 5-21 CHARGE DE TRAVAIL TOTALE PONDEREE 161

LISTE DES ABREVIATIONS

BCI *: Interface cerveau-ordinateur*

EH *: Avec retour haptique émulé*

EHNSh *: Avec retour haptique émulé et sans contrôle partagé*

EHSh *: Avec retour haptique émlé et avec contrôle partagé*

ETC *: Espace de Travail Commun*

LoA *: Niveau d'automatisation*

MPC *: Commande prédictive à base de modèle*

NEH *: Sans retour haptique émulé*

NEHNSh *: Sans retour haptique émulé et sans contrôle partagé*

NEHSh *: Sans retour haptique émulé et avec contrôle partagé*

NSh *: Sans contrôle partagé*

SA *: Conscience de la situation*

SC *: Savoir-Coopérer*

SF *: Savoir-Faire*

Sh *: Contrôle partagé*

WithInfo *: Avec informations supplémentaires sur l'ETC*

WithoutInfo *: Sans informations supplémentaires sur l'ETC*

INTRODUCTION GENERALE

CONTEXTE ET MOTIVATION

Nous vivons actuellement à l'ère de la technologie et du progrès numérique. Dans les années à venir, une époque robotique majeure nous attend. De nos jours, la robotique s'enracine dans divers domaines. Les robots sont utilisés et impliqués dans nos vies quotidiennes afin de nous rendre service et mener à bien certaines de nos tâches. La science-fiction a joué un rôle inspirateur pour de nombreux roboticiens. Elle donne plusieurs illustrations de la robotique de service. À titre d'exemple, le film américain Robot and Frank, Frank un ancien cambrioleur, retraité reçoit un robot aide-soignant. Le robot est destiné à améliorer la santé de Frank, en le motivant par un emploi du temps régulier, en lui préparant des repas équilibrés et en l'incitant à faire du jardinage. Nos travaux s'intéressent particulièrement aux robots mobiles terrestres employés pour intervenir dans des environnements dangereux et impropres à la vie humaine et ceux utilisés pour pallier certains handicaps et lutter contre la dépendance.

Plusieurs techniques et approches ont été développées dans le but d'améliorer les capacités de ces robots et d'aider au mieux les humains. De ce fait, les robots deviennent de plus en plus complexes mais soulèvent des questions de fiabilité, d'ergonomie et de sécurité, de par leur interaction avec l'humain et notamment dans des environnements complexes et dynamiques. Un système homme-robot peut être soumis à différentes perturbations de type environnementales, techniques ou humaines. Il est donc important de faire face à ces éventuelles perturbations pour assurer un niveau de performance et de sécurité suffisant.

Dans cette thèse il n'est pas question de construire un robot dont la robustesse est maximale, ou disposant d'un niveau d'autonomie élevé, objectif souvent recherché dans plusieurs travaux actuels, mais il est question de mettre en place un meilleur ajustement entre les capacités et les compétences de l'humain et du robot à tout instant. Cet objectif est réalisé à travers l'adaptation dynamique des niveaux d'automatisation notés LoA (pour Levels of Automation selon la notation de la littérature). C'est ainsi que se pose la question : quand et comment assurer une bonne adaptation des LoA pour une meilleure performance et une meilleure coopération ?

Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans le cadre du projet régional « SUCRé » pour « Sureté de fonctionnement et résilience pour la gestion et le contrôle coopératif des systèmes sociotechniques ». Il associe deux (ex-) régions : la Champagne-Ardenne et le Nord-Pas de

Calais. Ce projet repose sur l'étude et la mise en œuvre d'outils d'aide à la coopération homme(s)-robot(s) dans un système sociotechnique, évoluant dans des environnements complexes et dynamiques. SUCRé s'intéresse à une problématique particulière de l'interaction homme-robot et porte sur un certain nombre de verrous scientifiques provenant de l'automatique, de l'informatique et de la psychologie cognitive. Les travaux de recherche menés dans ce domaine portent souvent sur les notions de collaboration, d'interaction entre l'homme et le robot, mais peu sur la coopération.

La coopération se caractérise par une forte complémentarité entre l'humain et le robot, mais sans conduire à la dépendance. Les agents, humain et robot, travaillent en équipe et poursuivent un but commun en réalisant des tâches de planification et de contrôle. Dans une situation de coopération, l'humain et le robot cherchent à se faciliter leurs tâches respectives (Millot, 2014).

Dans ce contexte, cette thèse s'intéresse de plus près à la question des LoA adaptables pour assurer une bonne coopération entre l'humain et le robot. Notre démarche revient à proposer une méthode d'identification et de mise en œuvre des LoA d'un système homme-robot, en utilisant les principes fondamentaux de la coopération homme-machine. La coopération est modélisée sur les trois niveaux d'abstraction, stratégique, tactique et opérationnel, en identifiant les différentes interactions possibles à chaque niveau et entre les niveaux.

Les notions de l'allocation de fonctions et de gestion d'autorité entre l'humain et le robot sont définies pour chaque LoA. Ainsi, nous avons implémenté les LoA définis dans deux systèmes homme-robot conçus dans le cadre de la gestion de crise et dans le cadre du handicap.

En plus de l'aspect technique, ces travaux visent à étudier et évaluer la coopération homme-robot dans chaque système réalisé. Des tests expérimentaux menés avec des participants ont permis à la fois de valider la mise en œuvre des systèmes et des LoA et de relever d'éventuelles améliorations concernant l'adaptabilité dynamique des LoA et les critères les contrôlant.

ORGANISATION DU MEMOIRE

Le mémoire de cette thèse est organisé en cinq chapitres :

Chapitre 1. Vers une coopération homme-robot. Ce chapitre est consacré à un historique rapide de la robotique et s'intéresse plus particulièrement à la robotique mobile terrestre de

service. Il expose les limitations liées à l'automatisation d'un système robotique et leurs conséquences sur les opérateurs humains. Compte tenu de ces éventuels problèmes, il est essentiel de garder l'opérateur humain dans la boucle de supervision et de contrôle. De plus, il est important de prendre en compte le facteur humain lors de la conception d'un système homme-robot. L'implication de l'humain et du robot dans le même procédé met en avant l'importance de l'allocation dynamique de tâches et de fonctions en déployant une adaptation dynamique des LoA.

Chapitres 2. La coopération homme-machine, cadre théorique. Ce chapitre présente une synthèse des LoA adaptables et adaptatifs proposés dans la littérature en s'appuyant sur le concept de la coopération homme-machine. Ce cadre théorique propose des formes, structures et mode de coopération pouvant servir de base à la construction des LoA.

Chapitre 3. Proposition d'une méthodologie de conception de niveaux d'automatisation. Dans le but de soutenir la coopération entre l'humain et le robot, le chapitre 3, présente la réflexion menée pour élaborer les LoA en adoptant une démarche formelle conduisant à l'identification de LoA dont la structure repose sur les quatre fonctions génériques des savoir-faire et savoir-coopérer.

Chapitre 4. Implémentation et évaluation de la coopération homme-robots dans le cadre de la gestion de crise. L'objet de ce quatrième chapitre concerne la mise en œuvre technique d'une coopération homme-robots. Un système composé de deux robots mobiles, se déplaçant dans un environnement hostile et d'une interface de supervision et de contrôle utilisée par un opérateur humain, est réalisé et évalué. Trois LoA, définis dans le chapitre 3, sont implémentés dans ce système. La coopération entre l'homme et les deux robots est évaluée dans le cadre de la gestion de crise. Les résultats de l'expérimentation sont présentés et discutés.

Chapitre 5. Implémentation et évaluation de la coopération homme-robot dans le cadre du handicap. Ce chapitre propose un système coopératif homme-robot pour les personnes à mobilité réduite. Le but de ce chapitre est de pouvoir fournir à ces personnes un niveau d'assistance suffisant pour permettre le contrôle et la coopération avec un robot de téléprésence. Dans ce cadre, un système homme-robot mettant en œuvre une interface de contrôle cerveau-ordinateur est développé. Deux LoA liés aux compétences du robot (définis dans le chapitre 3) et deux LoA liés à l'assistance fournie pour son contrôle via l'interface cerveau-ordinateur sont implémentés. Deux études expérimentales sont menées dans le but d'évaluer la coopération homme-robot selon les différents LoA. Les résultats de ces études sont présentés et discutés.

Conclusion générale et perspectives. Une synthèse des résultats et l'apport des études expérimentales pour la coopération homme-robots sont proposés. Ces travaux ouvrent sur des perspectives qui sont détaillées.

LISTE DES PUBLICATIONS

Revues internationales avec comité de lecture

- Habib L., Pacaux-Lemoine M.-P., Millot P. (2019). Adaptable Levels of Automation for Human-Robots Cooperation. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics (soumis).

Conférences internationales avec actes et comité de lecture

- Pacaux-Lemoine M.-P., Carlson T., Habib L., Sciacca N. (2020). Emulated haptic-shared control for brain-computer interfaces improves human-robot cooperation. In 2020 IEEE International Conference on Human-Machine Systems (ICHMS) (en cours de soumission).
- Merrad, W., Habib, L., Héloir, A., Kolski, C., & Krueger, A. (2019). Tangible tabletops and dual reality for crisis management: case study with mobile robots and dynamic tangible objects. In 2019 Procedia Computer Science, 151, 369-376.
- Habib, L., Pacaux-Lemoine, M. P., & Millot, P. (2018). Human-Robots Team Cooperation in Crisis Management Mission. In 2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC) (pp. 3219-3224).
- Pacaux-Lemoine, M. P., Habib, L., & Carlson, T. (2018). Human-robot cooperation through brain-computer interaction and emulated haptic supports. In 2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT) (pp. 1973-1978).
- Habib, L., Pacaux-Lemoine, M. P., & Millot, P. (2017). Adaptation of the level of automation according to the type of cooperative partner. In 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC) (pp. 864-869).
- Habib, L., Pacaux-Lemoine, M. P., & Millot, P. (2017). A method for designing levels of

automation based on a human-machine cooperation model. IFAC-PapersOnLine, 50(1), 1372-1377.

- Pacaux-Lemoine, M. P., Habib, L., Tartare, G., Koehl, L., & Zeng, X. (2017, June). Human-robots cooperation through intelligent garment. In 2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) (pp. 1996-2001).

- Habib, L., Pacaux-Lemoine, M. P., & Millot, P. (2016). Towards adaptability of levels of automation with Human-Machine cooperation approach. In 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC) (pp. 001081-001086).

Livrables de projet et rapports techniques

- Djemai M., Defoort M., Demesure G., Pacaux-Lemoine M.-P., Habib L., Zeng X., Koehl L., Tartare G., Manamanni N., Messai N., Martinez S., Muanza diba C., Bouraqadi N., Fabresse L., Lozenguez G., Laval J., Yan Z., Baizid K., Cocquempot V., El badaoui el najjar M., Ma Y., Al dujaili A. (2016). Livrable L5 : Partage du contrôle Homme(s)-robot(s). Projet SUCRé (Sûreté de fonctionnement et résilience pour la gestion et le contrôle coopératifs des systèmes sociotechniques : Application à la coopération Humains-Robots en milieu hostile), LAMIH.

Poster

- Merrad W., Habib L., Héloir A., Kolski C., Krüger A. (2019). Tangible tabletops and dual reality for crisis management: preliminary study. Poster, MdC 2019, Mardi des Chercheurs, Mons, Belgium.

1 VERS UNE COOPERATION HOMME-ROBOT

1.1 Introduction

Afin de concevoir des systèmes coopératifs homme-robot(s) de service, nous nous inspirons des principales recherches menées depuis des décennies sur les systèmes homme-machine. Ce chapitre définit les robots de service et présente leur évolution chronologique. Il s'intéresse plus particulièrement aux robots mobiles de service et expose ainsi les enjeux de leur automatisation. C'est dans ce contexte qu'il identifie les principaux impacts facteurs humains de l'automatisation dans le système homme-robot. Le chapitre met en avant le besoin d'approfondir l'étude des systèmes homme-robot dès la phase de conception afin d'assurer une bonne coopération entre l'humain et le robot et garantir une performance optimale de tout le système. Ainsi il définit la conception et l'automatisation centrée sur l'humain des systèmes homme-machine applicable à un système homme-robot. Finalement, il tire sa conclusion sur l'importance de l'allocation dynamique de tâches et de fonctions entre l'humain et la machine.

1.2 La robotique

Au fil des années, la robotique a connu une évolution remarquable. Différents chercheurs ont contribué au développement des premiers robots, qui sont les ascendants directs des robots d'aujourd'hui. C'est dans cette optique que nous entreprenons à revenir sur le parcours de certains robots qui ont marqué l'histoire de la robotique.

1.2.1 Brève histoire de la robotique

L'histoire des robots a commencé il y a plus de 4500 ans. Au IV^{e} siècle av. J. –C., Aristote conçoit l'idée même du robot par ces mots : « Si chaque instrument pouvait accomplir son propre travail, obéissant ou anticipant la volonté des autres… ». Dhillon pense que l'idée du robot fonctionnel devrait être attribuée à la Grèce antique (Dhillon, 2012). Dans les années 1720, les premiers métiers à tisser automatisés ont été développés en France. Basile Bouchon, tisserand lyonnais invente en 1725 une machine programmable. Son mécanisme est contrôlé par des cartes perforées afin de gérer le passage des aiguilles dans le tissu. En 1773, des artisans suisses ont développé des automates à la forme humaine capables d'écrire, de dessiner et de jouer des instruments de musique (Renoult, 2015). Les premiers automates appelés « robots » sont apparus en 1921, à la suite du nom de « robot » de l'écrivain tchèque Karel Capek (Capek, 2004). En 1939, Isaac Asimov a écrit une série de nouvelles sur les robots et a inventé en 1941 le mot « robotique » pour désigner la science et la technologie des robots (Asimov, 1941). Neuf de ces histoires ont été publiées en 1950 dans un livre intitulé « Robots ».

En 1954, G. Devol et J. Engelberger ont inventé le premier robot industriel *Unimate* (cf. Figure 1-1), considéré comme un descendant direct des premiers télémanipulateurs développés pour la manipulation d'éléments radioactifs. *Unimate* fonctionne d'une manière parfaitement mécanique, il a la capacité de faire des mouvements précis à grande vitesse, plusieurs fois et sur de longues périodes. *Unimate* représente les robots de première génération. Durant cette période, les recherches en robotique se sont fortement intéressées à la conception mécanique et la cinématique des mécanismes.



Figure 1-1 Le robot Unimate

Dès la fin des années 60, les scientifiques ont commencé à se poser des questions relatives à l'intérêt théorique et pratique de développer des robots qui ne travailleraient pas en aveugle, mais qui seraient munis de capteurs leur permettant de percevoir et d'avoir des informations

sur la tâche qu'ils exécutent, définissant ainsi les robots de deuxième génération. Par la suite, la nécessité de rendre les robots adaptatifs et capables d'analyser la tâche à réaliser et de l'exécuter en fonction de son évolution est identifiée. Ainsi, en plus des deux fonctions précédentes (la perception et l'action), une nouvelle fonction caractérise les robots de troisième génération. Cette fonction vise à rendre les robots « intelligents » en leur offrant la capacité d'autonomie décisionnelle et opérationnelle.

Entre 1966 et 1972, le laboratoire « The Artificial Intelligence Center » du Stanford Research Institute en Californie, a conçu le premier robot mobile autonome *Shakey*, petit véhicule sur quatre roues (cf. Figure 1-2), a pour fonction de se déplacer sans câbles dans un environnement intérieur partiellement inconnu et de transporter des objets. Les robots mobiles autonomes d'aujourd'hui sont les descendants directs de *Shakey*. La conception de ce robot a donné lieu à des concepts très intéressants. Néanmoins, beaucoup de progrès restaient à réaliser, tels que l'amélioration des capteurs.

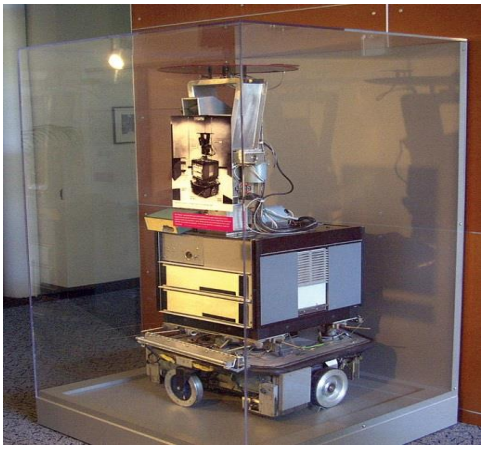


Figure 1-2 Le robot Shakey

En 1977, en référence au robot *Shakey*, le groupe robotique du Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systèmes (LAAS)[1] à Toulouse a décidé de reprendre cet objectif interrompu depuis 1972 et de lancer le projet *Hilare* (Heuristiques Intégrés aux Logiciels et aux Automatismes dans un Robot Evolutif) (cf. Figure 1-3). Cependant, le projet *Hilare* différait de *Shakey* en ce qu'il s'intéressait principalement à l'interaction du robot avec l'environnement dans lequel il évolue. *Hilare* est un robot doté de plusieurs capteurs lui permettant de percevoir son environnement et d'agir. Il est également capable de mémoriser les obstacles d'un itinéraire dans un environnement complexe. Vers la seconde moitié des années

[1] Aujourd'hui Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes https://www.laas.fr/public/fr/pr%C3%A9sentation-du-laboratoire

80, *Hilare* sert de support à beaucoup de travaux applicatifs et démonstratifs.

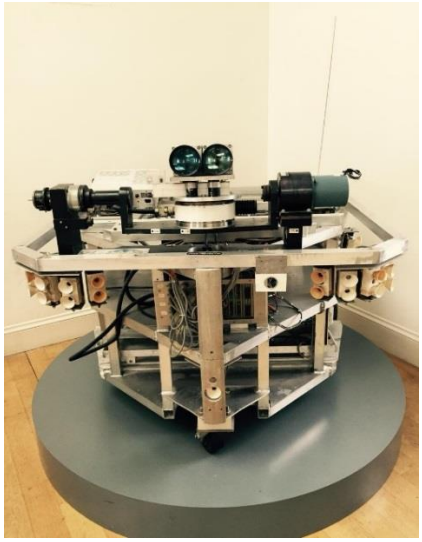


Figure 1-3 Le robot Hilare

Depuis les années 80, une très grande majorité de projets se sont développés partout dans le monde afin de doter les robots « d'intelligence artificielle » pour améliorer leur autonomie. De nombreux chercheurs se sont intéressés au développement de plusieurs types de robots utilisés dans différents domaines d'application. Ces travaux ont donné naissance à des robots de service qui travaillent avec les humains de façon proche et complémentaire ce qui a suscité l'importance de l'interaction et de la coopération homme-robot.

1.2.2 La robotique au service de l'humain

Il est important de rappeler la définition du robot donnée par le Robot Institute of America (1979) : « un robot est un manipulateur reprogrammable et multifonctionnel conçu pour déplacer des matériaux, des pièces, des outils ou des dispositifs spécialisés selon différents mouvements programmés pour l'exécution de diverses tâches ». Cette définition concerne les robots industriels utilisés présentement dans les entreprises manufacturières.

Afin d'éviter toute confusion avec les robots industriels, de son côté l'IFR [2] (« International Federation of Robotics ») a adopté une définition des robots appelés *robots de service*, qui travaillent avec les humains comme des coéquipiers, « robots qui exécutent des tâches utiles pour des humains ou des appareillages, excluant les applications d'automatisation industrielle ». Actuellement, il existe plusieurs catégories de robots de service : humanoïde, mobile, volant, sous-marin, exosquelette et manipulateur (cf. Figure 1-4). Cette classification,

[2] https://ifr.org/service-robots

bien que non exhaustive des robots actuels, donne néanmoins une idée de la portée de la robotique de service aujourd'hui et dans les années à venir.



(a) Sophie par Hanson Robotics



(b) Colossus par Shark Robotics



(c) par Pixiel



(d) Ulisse par CEPHISMER



(e) Phoenix par SuitX



(f) KUKA par KUKA AG

Figure 1-4 Types de robots de service. (a) robot humanoïde. (b) robot mobile. (c) robot volant. (d) robot sous-marin. (e) robot exosquelette. (f) robot manipulateur.

Au cours des dernières années, les principaux domaines d'application axés sur la recherche robotique de service sont les suivants : entretien ménager, assemblage et réparation

d'équipements, exploitation minière, maintenance de réacteurs nucléaires, inspection et développement maritime, assistance médicale, assistance pour personnes à mobilité réduite, missions militaires dangereuses et gestion de crise.

1.2.3 Les humains et les robots mobiles de service

Très tôt les chercheurs en robotique de service ont été confrontés à la nécessité de caractériser la « relation » entre les humains et les robots. L'illustration sans doute la plus célèbre est représentée par les trois lois de la robotique d'Asimov (1942) : *Loi 1* : *un robot ne peut faire de mal à un être humain, ou, restant inactif, permettre que du mal soit fait à un être humain. Loi 2 : un robot doit obéir aux ordres des êtres humains, sauf si de tels ordres entrent en contradiction avec la première loi. Loi 3 : un robot doit préserver sa propre existence dans la mesure où celle-ci ne rentre pas en contradiction avec la première ou la deuxième loi*.

En d'autres termes, les robots sont conçus dans le but d'aider les humains et de leur rendre service, sans possibilité d'effectuer d'action contraire à leurs intérêts.

Les robots mobiles de service actuels ont le potentiel d'aider les humains dans de nombreuses tâches et des environnements différents. Cette thèse se place dans cet objectif. Nous illustrerons notre recherche par le contexte applicatif de la coopération homme-robots dans deux types de missions :

- dans la première mission, des robots mobiles sont déployés en soutien aux pompiers lors d'une gestion de crise.

- dans la seconde nous étudions l'assistance aux personnes à mobilité réduite, atteintes de tétraplégie.

Dans les deux types de missions, selon leur niveau d'autonomie, les robots sont capables à des degrés différents de contrôler leurs déplacements et d'éviter les obstacles dans un environnement inconnu et dynamique, pour atteindre les objectifs des humains et en partageant ou non le même environnement.

Cependant, du fait de problèmes techniques tels que les capacités de traitement de données et de décision limitées, amplifiées par des communications limitées (bruit des capteurs, bande de communication étroite…) il est encore impossible à ce jour de concevoir un système robotique parfaitement autonome capable de répondre à toutes les exigences d'un environnement dynamique et complexe. La seule solution est alors de faire appel à l'humain, qui lui est capable d'analyser la situation et la tâche du robot ou du groupe de robots.

Néanmoins, la littérature montre que l'augmentation des capacités d'autonomie des robots (automatisation élevée) rend ces derniers plus complexes et beaucoup moins prévisibles à l'humain. En effet, il sera difficile pour l'humain de se construire un modèle des robots, une représentation précise de la situation et surtout de pouvoir la mettre à jour pour agir très rapidement. Ces difficultés sont présentées dans la section suivante consacrée aux principaux problèmes d'automatisation dans la robotique mobile et à leurs influences sur les performances des humains.

1.3 Limites de l'automatisation en robotique mobile

Le domaine de la robotique mobile est confronté à certaines limites à prendre en compte lors de la conception d'un système coopératif homme-robot.

1.3.1 Fiabilité et capacité du robot

Dans la norme française de la maintenance, la fiabilité est définie comme « la probabilité ou l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise dans des conditions données durant un intervalle de temps donné » (Gusmini, 2001). En d'autres termes, c'est la probabilité et l'aptitude d'un système à fonctionner et réaliser l'objectif souhaité dans des conditions déterminées pendant un intervalle de temps déterminé.

De nos jours aucun robot mobile ne peut être fiable à 100%. En effet, les algorithmes existants ne sont pas complétement en mesure de considérer et fonctionner parfaitement dans toutes les situations possibles et dans les environnements opérationnels souvent complexes et dynamiques (Carlson & Murphy, 2003) (Steinbauer, 2013), tels que le serait un bâtiment en feu. La prise en compte de la fiabilité d'un système automatisé ou d'un robot s'avère primordiale pour garantir une performance optimale du système homme-robot. C'est dans cette optique que certains chercheurs ont mené des études dont les résultats montrent la relation entre l'automatisation et la fiabilité. Ils suggèrent qu'une tâche réalisée d'une façon automatique est souvent plus intéressante et bénéfique pour l'humain qu'une tâche manuelle à condition que la fiabilité de l'automatisation soit à 100% (Moray, Inagaki, & Itoh, 2000) (Horrey & Wickens, 2001). En effet, il faut noter qu'une dégradation du niveau de fiabilité du robot peut avoir un impact négatif sur la confiance de l'humain et porter préjudice à son utilisation pour l'automatisation (Lee & Moray, 1992). La confiance dans l'automatisation a fait l'objet de plusieurs études (Lee & See, 2004) (Rajaonah, 2006) (Parasuraman, Sheridan, & Wickens, 2008) (Itoh & Pacaux-Lemoine, 2018). Dans certains ouvrages la confiance est définie comme

« un état ou une attitude liée aux attentes des humains ». La confiance peut cependant influer sur le comportement de dépendance vis-à-vis du système automatisé (Lee & See, 2004), (Parasuraman & Riley, 1997) (Parasuraman & Wickens, 2008). Il convient de noter que, la confiance se mesure subjectivement et n'est pas une mesure de performance. En robotique, elle est considérée par certains chercheurs comme un processus compliqué car d'après eux la technologie permet de créer des robots capables de tromper l'humain (Wagner & Arkin, 2011). En effet, les résultats de l'interaction entre l'humain et le robot peuvent être très différents des résultats initialement espérés par l'humain compte tenu des intentions du robot imaginées par l'humain. Par conséquent, le niveau de méfiance de ce dernier envers le robot augmente au détriment de sa confiance. Dans le cas d'une forte automatisation, l'impact de ce facteur est d'autant plus important que l'intervention humaine en cas de défaillance sera plus compliquée et longue (Endsley & Kiris, 1995) (Endsley & Kaber, 1999).

La fiabilité peut être évaluée en fonction de la performance de l'automatisation lors de la réalisation d'une tâche. Celle-ci peut être directement liée aux caractéristiques et aux exigences de la tâche. Notons que la tâche réalisée par l'automatisation varie en fonction du niveau d'automatisation (en anglais LoA pour Level of Automation).

Dans la robotique mobile, comme il a été mentionné précédemment, la capacité d'un robot à réaliser une tâche est définie par son LoA (son autonomie) (cf. chapitre 2). Malgré les avancées technologiques dans ce domaine, la capacité des robots à fonctionner de manière autonome reste limitée. C'est particulièrement vrai lorsque les robots font face à des situations qui dépassent leurs capacités ou à des pannes qui surviennent au cours de l'exécution de la tâche. Il est donc essentiel d'ajuster le LoA du robot en fonction de sa fiabilité afin d'obtenir des performances optimales (Parasuraman, Sheridan, & Wickens, 2000). La fiabilité et la capacité d'adaptation des robots aux préférences et aux besoins des opérateurs humains peuvent aussi avoir un effet sur l'acceptabilité des robots (Young et *al.*, 2009). Il existe une manière distincte pour mesurer la fiabilité d'un robot lorsqu'il n'est pas assisté par l'humain. Elle consiste à identifier le temps pendant lequel le robot peut être négligé par l'humain avant que la performance ne se dégrade en dessous d'un niveau acceptable (Olsen & Goodrich, 2003).

1.3.2 Transparence et retour d'informations

La transparence de l'automatisation est définie comme « la qualité d'une interface permettant à un opérateur humain de comprendre l'intention, les performances, les plans futurs et le processus de raisonnement d'un agent intelligent » (Mercado et *al*., 2016). De nombreuses

études ont montré que la conception des systèmes offrant aux utilisateurs un retour d'informations précis sur leur fiabilité ou leur fonctionnement peut améliorer la confiance de l'humain envers l'automatisation (Dadashi, Stedmon, & Pridmore, 2013). Il a ainsi été montré qu'un niveau élevé de transparence de l'automatisation peut réduire l'effet « cry wolf »[3] (Yang et *al*., 2017). Cet effet est exprimé par des appels à l'aide excessifs de la part de l'humain (même quand il en n'a pas besoin), mais ensuite, lorsqu'il en a vraiment besoin, ses appels ne sont plus entendus. Une transparence de qualité permettrait ainsi d'améliorer la performance du système homme-robot.

Les robots doivent être conçus de manière à permettre à l'humain de les observer pour comprendre leurs décisions et actions. L'humain doit être en mesure de se créer un modèle mental du robot avec lequel il interagit. La littérature montre que le retour d'informations est très important pour favoriser la transparence, même lorsque l'automatisation fonctionne correctement. C'est ainsi que les interfaces doivent être conçues de manière à aider l'opérateur humain à comprendre les capacités et les limites fonctionnelles des systèmes automatisés (Kaber et *al*., 2001). Goodrich et Olsen soulignent l'importance de la conception des interfaces de supervision et de contrôle pour assurer la transparence du robot et permettre à l'humain de construire un modèle mental approprié du robot (Goodrich & Olsen, 2003), (Beer, Fisk, & Rogers, 2014). Dans les environnements dynamiques, les situations, les interactions et les plans de mission peuvent changer rapidement et de façon inattendue. De la même façon les objectifs peuvent être redéfinis. Le robot doit alors adapter son comportement tout en maintenant la transparence et le retour d'informations afin d'assurer une bonne coopération avec l'humain.

1.4 Les facteurs humains et l'automatisation dans un système homme-robot

L'étude des facteurs humains permet d'analyser et d'optimiser la relation entre les humains et leurs activités, par l'intégration des sciences humaines et de l'ingénierie des applications systématiques, en tenant compte des aspects cognitifs et des contextes de travail sociotechniques (Cacciabue, 2004). La littérature abonde d'études mettant en évidence l'influence de l'automatisation sur l'opérateur humain et l'importance de considérer certains facteurs lors sa de conception. Dans cette thèse, nous nous intéressons particulièrement à la dégradation de la conscience de la situation et à la charge de travail car nous estimons que ce

[3] L'expression trouve sa source dans une fable de l'écrivain grec Ésope traduit en français par *le garçon qui criait au loup*

sont les deux facteurs majeurs qui peuvent conduire à la dégradation de la performance humaine.

1.4.1 Conscience de la situation

La conscience de la situation (en anglais « Situation Awareness SA ») a fait l'objet de nombreuses recherches (Endsley, 1995) (Durso & Sethumadhavan, 2008) (Parasuraman & Wickens, 2008). Millot (2015) dresse un inventaire des définitions proposées et retient celle de Endsley (1995) plus compatible avec le modèle cognitif de Rasmussen (1983) et la démarche de l'automaticien humain dans laquelle s'inscrit cette thèse : la SA est « la capacité humaine à développer une représentation interne de la situation courante, de son environnement et à projeter son état dans un avenir proche ». En d'autres termes, trois niveaux de SA d'un humain impliqué dans une tâche sont nécessaires : la SA1 concerne la perception de l'état, des attributs et des évènements dans l'environnement dans un espace-temps, la SA2 est décrite comme la compréhension de la signification des éléments perçus dans la SA1, et enfin la SA3 représente la capacité de l'humain à projeter l'état des éléments dans un futur proche. La SA est considérée comme une construction psychologique, indépendante de la performance et du comportement humain. Ainsi un opérateur humain peut faire preuve d'une performance élevée tout en ayant de faibles niveaux de SA (Beer et *al.*, 2014) et inversement, il peut très bien percevoir et identifier un problème sans connaitre la solution.

Il est tout de même important de maintenir une SA suffisante de l'humain. Toutefois, l'introduction de l'automatisation risque de la dégrader en retirant les humains de la boucle de contrôle. Il convient donc d'assurer un équilibre entre l'automatisation et l'implication des humains dans la tâche.

L'importance de garder l'humain dans la boucle de contrôle et de maintenir sa SA est particulièrement soulignée en cas d'échecs de l'automatisation. En d'autres termes, en cas de défaillance ou de situation ingérable par l'automatisation, le fait que l'opérateur humain soit hors de la boucle de contrôle, c'est-à-dire ne soit pas pleinement « conscient de la situation » pose problème. L'opérateur humain peut ne pas être en capacité de diagnostiquer le problème et d'intervenir à temps (Endsley, 2006). La littérature dispose d'un riche contexte empirique de la SA en automatisation notamment dans le domaine du trafic aérien et de l'aviation. En robotique, des travaux ont été menés dans des missions telles que la recherche et le sauvetage (Riley & Endsley, 2004), la téléopération de drones (Scholtz, Antonishek, & Young, 2004) et les opérations militaires (Kaber, Wright, & Sheik-Nainar, 2006).

Gombolay et *al.* (2017) ont étudié l'évolution de la SA de l'humain en fonction du LoA d'un robot lors d'une tâche de planification. Ils ont constaté que la SA de l'humain diminuait lorsque le LoA du robot augmentait. Cela indique que le désir d'une autonomie accrue doit être mis en balance avec le risque de réduction de la SA.

Des études réalisées sur l'influence des LoA sur les performances des humains ont montré une meilleure SA lorsque le LoA était faible plutôt qu'élevé (Onnasch et *al.*, 2014) (Wickens et *al.*, 2015). En plus de la SA, la charge de travail de l'humain peut aussi être influencée par l'automatisation.

1.4.2 Charge de travail

Suite à certains facteurs humains comme par exemple la fatigue et le stress, les humains ne sont souvent pas en mesure de réaliser toutes les tâches de manière rapide, précise et fiable en utilisant les ressources disponibles. À cet effet, le concept de la charge de travail est d'une importance considérable pour caractériser (voire quantifier) le coût de réalisation de la tâche par l'humain, aussi bien physique que mental.

Selon Sperandio, la charge de travail est « le niveau d'activité mentale, sensorimotrice et physique nécessaire pour l'accomplissement d'une tâche ». De cette définition, on distingue deux composantes de la charge de travail (Sperandio, 1987). La charge de travail physique et la charge de travail mentale. La charge de travail physique fait référence aux efforts physiques réalisés par l'humain lors de l'exécution d'une tâche, notamment liés aux activités de perception et d'action (activités sensori-motrices), par exemple lors de la téléopération d'un robot par un joystick. La charge de travail mentale correspond à l'effort mental effectué par l'humain pour l'accomplissement de la tâche. Elle dépend principalement des exigences de la tâche définies en termes par exemple de rapidité, de difficulté de traitement et des capacités de l'humain (Sperandio, 1987). La charge de travail est donc une variable importante qui caractérise l'état de l'humain lors de l'exécution de la tâche. Son évaluation doit permettre d'estimer l'adéquation des difficultés dues à la réalisation de la tâche avec les capacités et les ressources de l'humain. De nombreuses méthodes d'évaluation de la charge ont été étudiées dans les années 80 fondées sur l'utilisation d'observateurs de l'opérateur, physiologiques (*e.g.* électrocardiographie, électroencéphalographie, diamètre pupillaire, …) ou psychologiques (utilisation de questionnaires) (Millot, 1988).

Deux méthodes fondées sur l'utilisation de questionnaires ont donné d'intéressants résultats : SWAT (Subjective Workload Assessment Technique (Potter & Bressler, 1989)) et

TLX (Task Load indeX) développée par la NASA (Hart, 2006). La première consiste à établir à partir des réponses de l'opérateur humain une série de questions en ligne, relatives à trois indicateurs : exigences temporelles, exigences fonctionnelles et stress. Les questions sont posées selon une période d'échantillonnage de l'ordre de quelques minutes, les triplets d'indicateurs obtenus sont utilisés pour donner l'évolution de la charge au cours de la réalisation de la tâche. La seconde, méthode TLX, donne un indice global en posant le questionnaire après la fin de la tâche selon six indicateurs : exigences temporelles, exigences mentales, exigences physiques, satisfaction de l'humain vis-à-vis de sa performance, effort et stress. Les indicateurs sont agrégés en une somme pondérée, le poids de chaque indicateur étant aussi déterminé par l'opérateur humain.

L'un des avantages fondamentaux de l'automatisation des systèmes complexes est la diminution des risques de la mise en difficultés de l'humain du fait d'une diminution de sa charge de travail. Cependant, une mauvaise conception de l'automatisation peut induire une augmentation de la charge de travail mentale (effort cognitif supplémentaire) (Parasuraman & Riley, 1997). Un ensemble d'études empiriques a été réalisé dans le but de tester l'impact de la charge de travail sur la performance de l'humain. Dans une étude menée par Kaber et *al*. (2001), il a été constaté que lorsque l'humain réalise une tâche de surveillance et une autre de contrôle dynamique automatisé, ses performances diminuent quand sa charge de travail augmente. Toutefois, la charge de travail dépend du LoA du système homme-machine. Avec un LoA élevé, la charge de travail imposée par la tâche automatisée est progressivement réduite (Onnasch et *al*., 2014).

Il existe une relation entre la charge de travail et la SA. Une charge de travail élevée associée à une faible automatisation conduit généralement à une SA faible pour l'humain et à une baisse de performance (Endsley & Kiris, 1995). De manière générale, il a été suggéré que des LoA intermédiaires pourraient atténuer ces problèmes. Certains travaux ont révélé l'importance d'un compromis entre la SA et la charge de travail au risque de provoquer des erreurs de performance fatales.

Nous sommes donc face à un dilemme bien connu du LoA d'un système homme-machine, c'est-à-dire l'augmentation des capacités opératives et décisionnelles de la machine entraine l'augmentation du LoA et permet de réduire la charge de travail de l'opérateur humain. Cependant, cette démarche tend à sortir l'humain de la boucle de contrôle et à réduire sa SA, alors que certaines situations ne peuvent être gérées que par l'humain. Il est donc souhaitable d'adapter le LoA selon les capacités, les limites et la SA de l'humain.

Les principes de conception de systèmes homme-machine permettant de soutenir la SA et de réguler la charge de travail de l'humain dans les opérations en équipe, peuvent être appliqués pour des équipes homme-robot (Gorman, Cooke, & Winner, 2006).

1.5 Conception et automatisation d'un système homme-machine

Le mot "conception" fait référence à la conception abstraite jusqu'à la création des plans et des processus réels qui permettent la réalisation d'une chose (Giacomin, 2014). La littérature propose deux approches fondamentales de conception des systèmes homme-machine : la conception centrée sur l'humain et celle centrée sur la machine. Le mot machine désigne un système doté d'un certain niveau d'intelligence permettant de réaliser des tâches en toute autonomie.

1.5.1 Conception centrée sur la machine

Classiquement, la démarche adoptée lors de l'automatisation des systèmes est celle centrée sur la machine. Les concepteurs ingénieurs développent des systèmes dans le but d'automatiser les fonctions souhaitées. Dans cette démarche, les interactions avec l'humain ne sont pas réellement considérées. Cela permet de garantir une performance optimale de la machine sur une plage de fonctionnement spécifique. Néanmoins, ceci ne permet pas d'établir une interaction homme-machine répondant aux exigences relevées dans les paragraphes précédents et ainsi provoque des incompréhensions de la part de l'humain dans certaines situations. En d'autres termes, l'humain exclu de la boucle ne sera plus disponible et opérationnel si le système a besoin de son intervention en cas de défaillance de la machine.

Dans la littérature, cette approche de conception est qualifiée de « résiduelle » par les ergonomes (Rabardel, 2014), (Chauvin & Hoc, 2014). La place occupée par l'humain est de plus en plus petite, il assume les tâches difficiles à automatiser ou non encore automatisées de façon satisfaisante selon des critères tels que la performance et la sécurité. Une telle stratégie de conception ne laisse finalement à l'humain qu'un ensemble de tâches hétéroclites trop complexes, voire impossibles à automatiser (Bainbridge, 1983). Rabardel (2014) pense que le point de vue « résiduel » fait appel à une opinion pessimiste de l'intervention humaine. Il rejoint ainsi le point de vue que partagent Johnson et Wilson (1988) : "les concepteurs se représentent le plus souvent l'opérateur humain comme un élément peu efficace et fiable des systèmes". Il souligne que les interventions humaines intempestives sont considérées comme de nature à troubler, voire à mettre en défaut, le fonctionnement des automates et des machines

sûres.

En ce sens, l'évolution technologique a tendance à réduire le champ de l'activité humaine et à rendre la machine plus autonome. Ceci a pour conséquence de limiter la place occupée par l'humain et les tâches qui lui ont été attribuées. Toutefois, de nombreux chercheurs croient aujourd'hui que, suite à la croissance de la complexité des systèmes automatisés, le rôle de l'opérateur humain devient de plus en plus important pour le fonctionnement efficace du système. Il reste, même de nos jours, en pratique impossible de tout automatiser et l'humain sera toujours indispensable en cas de problèmes inattendus qui empêcheraient le bon fonctionnement du système automatisé.

Finalement, l'humain ne doit pas être réduit à un dispositif de secours pour assurer les activités non automatisables. Il doit être pleinement intégré dans les boucles de commande, de contrôle et de supervision du système homme-machine, afin de tirer profit de ses capacités. Tous ces points représentent les enjeux de l'automatisation centrée sur l'humain.

1.5.2 Automatisation centrée sur l'humain

En référence à Billings (1997), l'automatisation centrée sur l'humain est « une automatisation conçue pour fonctionner en coopération avec des opérateurs humains dans la poursuite d'objectifs déclarés ». Par cette définition l'auteur met l'accent sur l'importance de la conception d'une automatisation qui puisse soutenir la performance et la compréhension par l'humain du système.

Si nous nous référons à l'organisation d'un système homme-machine, on en extrait le terme du niveau d'automatisation (LoA). Tel que l'illustre la Figure 1-5, Boy (2011) schématise l'environnement d'un système homme-machine par une pyramide *AUTOS (Artefact, Utilisateur, Tâche, Organisation et Situation)*.

Appliquée aux systèmes dynamiques homme-machine, l'artefact définit le système et l'utilisateur représente l'opérateur humain (Millot, 2014a). La pyramide intègre le triangle OST (Opérateur humain -Système-Tâche). L'opérateur humain réalise des tâches en interagissant avec le système en fonction de son niveau de familiarité avec ce dernier et en fonction des besoins techniques. Il est donc important d'apporter un soin particulier à l'aspect ergonomique du système homme-machine afin de faciliter les tâches humaines. L'organisation définit la répartition et la coordination des tâches et des rôles entre l'opérateur humain et le système, celle-ci est alors traduite par le LoA de ce dernier. Au cours de l'évolution du procédé, la

situation peut générer de nouveaux évènements et faire appel à un niveau suffisant de SA de l'opérateur humain pour lui permettre de détecter et de gérer des changements. Ces changements peuvent nécessiter une nouvelle organisation en fonction des compétences de l'opérateur humain et du système liées à cette nouvelle situation.

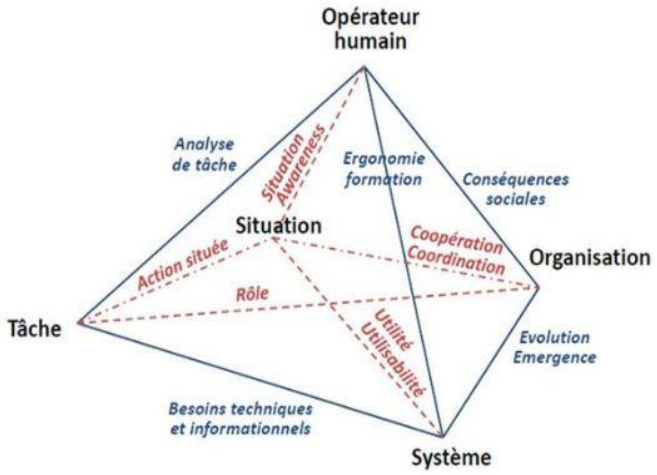


Figure 1-5 : Environnement du système homme-machine (Boy, 2011)

L'association de ces cinq dimensions montre que l'automatisation d'un système centrée sur les humains va bien au-delà du seul problème d'automatique. Elle doit s'inscrire dans un processus de conception du système homme(s)-machine centrée sur des humains, puisqu'on s'adresse de plus en plus à des équipes homme-homme et/ou homme-machine visant à la mise en place d'une coopération hommes-machine.

La conception centrée sur l'humain concerne la manière de concevoir des machines efficaces destinées à un usage humain. Le concept de conception centrée sur l'humain, proposé initialement par Norman et Draper (1986), a mis en évidence que la conception de systèmes interactifs devait être guidée par les besoins des opérateurs humains plutôt que par les possibilités technologiques.

Actuellement, le processus de conception centrée sur l'humain a été normalisé dans l'ISO 9241-210 (ISO 2010) « Ergonomie de l'interaction des systèmes centrés sur l'humain » (DIS, 2010). L'ISO 9241-210 recommande principalement six caractéristiques :

- « Utilisation de compétences et perspectives multidisciplinaires »
- « Compréhension explicite des utilisateurs, des tâches et des environnements »
- « Conception optimisée axée sur l'utilisateur »
- « Prise en compte de toute l'expérience de l'utilisateur »

- « Implication des utilisateurs tout au long de la conception et du développement »
- « Processus itératif plutôt que processus de conception linéaire et rigide »

Cette approche est considérée dans divers domaines tels que la psychologie cognitive et sociale, l'ergonomie, l'automatique et l'intelligence artificielle. Ce type de conception vise à rendre les systèmes homme-machine plus interactifs et coopératifs. Elle se concentre sur l'utilisation du système par l'opérateur humain en considérant les facteurs humains. Elle vise à comprendre les besoins, désirs et expériences des utilisateurs à qui le système est destiné. La nécessité de la conception centrée sur l'humain fait son apparition dans divers champs de recherche. On retrouve plusieurs réflexions et analyses des dimensions cognitives durant l'usage des outils informatiques, *e.g*. (Green & Hoc, 1991) et (Hollnagel, 1991). Chauvin et Hoc (2014) notent que l'approche centrée sur l'humain prend principalement en compte les actions de l'humain sur l'environnement ou sur la machine. Cette approche considèrerait donc la machine comme un assistant à l'activité humaine, ce qui aurait tendance à réduire les objectifs du développement technologique vers la conception de machines autonomes.

La conception d'un système homme-machine centrée sur l'humain est représentée par le cycle en V de conception des systèmes, revisité selon Boy (2011) pour introduire la dimension humaine (cf. Figure 1-6). Cette démarche propose de suivre un ensemble d'étapes :

- La première étape consiste à analyser les besoins des futurs utilisateurs, à identifier les contraintes techniques et les tâches à réaliser suivant les différentes situations de fonctionnement prévisible du système.
- La deuxième étape revient à définir les spécifications fonctionnelles et les allocations de ressources (*e.g*. moyens disponibles et nécessaires tels que les capteurs et les actionneurs).
- La troisième étape se pose le problème de l'allocation des tâches et des fonctions entre l'humain et la machine.
- La quatrième étape concerne la mise en œuvre du système homme-machine, autrement dit, l'implémentation des algorithmes informatiques pour la réalisation des tâches automatisées. Cette étape doit aussi mettre en œuvre les interfaces homme-machine et les outils nécessaires pour assurer l'interaction homme-machine et la réalisation des tâches humaines.
- Après la mise en œuvre du système homme-machine, vient l'étape de son intégration et

évaluation. Un ensemble de tests et validations techniques doit être réalisé. Il faut en supplément évaluer la qualité ergonomique du système homme-machine mis en œuvre. Pour ce faire, des tests utilisateurs sont à réaliser suivant des scénarios bien choisis impliquant toutefois des situations de fonctionnement et de dysfonctionnement permettant d'évaluer les coûts humains induits (*e.g.* charge de travail et conscience de la situation). Les résultats peuvent conduire à réaliser des améliorations et des modifications.

La conception centrée sur l'humain permet d'améliorer la performance du système homme-machine globale. Grâce à cette démarche nous estimons pouvoir considérablement améliorer l'acceptation et la satisfaction de l'humain et supprimer une grande partie de frustration. Ce type de conception aide à exploiter les machines de façon optimale et soutenir l'activité humaine (Endsley, 2016).

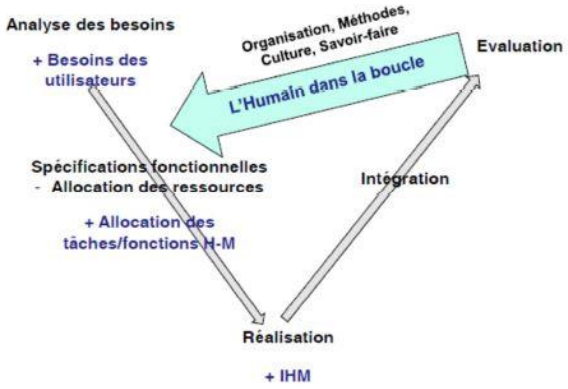


Figure 1-6 : Approche centrée sur l'humain (Millot, 2014a)

D'une manière générale, la conception centrée sur l'humain vise à étudier la performance humaine et à prédire son comportement. Ses avantages pour notre conception de la coopération homme-robot consistent à rendre le système interactif et coopératif facile à comprendre et à utiliser par les futurs utilisateurs. Cette approche pourrait être bénéfique pour bien concevoir l'automatisation du système homme-robot. Par conséquent, il est important d'étudier et d'analyser l'activité humaine afin de comprendre le comportement et la prise de décision de l'humain pour la résolution de problèmes lors de son interaction avec l'automatisation.

1.6 Analyse de l'activité et du comportement humain

Le comportement et l'activité de l'humain dans un environnement dynamique et complexe s'apparentent à des multiples niveaux de traitement de l'information et de contrôle moteur. Il devient de plus en plus nécessaire de modéliser le comportement humain et son

activité afin d'estimer la performance attendue d'un système homme-machine. En psychologie cognitive, des modèles mentaux sont utilisés pour donner une représentation du processus humain de compréhension d'une situation, de raisonnement sur cette situation et de prédiction de son évolution (Gentner, 2001). Un modèle est proposé par Rasmussen (1983). Il permet de définir en fonction du niveau de familiarité avec la tâche à réaliser, les différents niveaux cognitifs de son traitement. Afin de représenter l'activité humaine, Michon (1985) propose un modèle permettant de réaliser une interprétation des comportements humains percevables lors de l'exécution d'une tâche. Une différence remarquable entre ces deux modèles est que le modèle de Rasmussen se réfère plus particulièrement aux processus mentaux internes de l'humain, tandis que celui de Michon concerne les caractéristiques de la tâche à réaliser (Nilsson, 2001). Ces deux modèles sont présentés ci-après.

1.6.1 Modèle de Rasmussen

Rasmussen propose le modèle *SRK* (*Skills*, *Rules* and *Knowledge* pour *habiletés*, *règles* et *connaissances*). Il représente une classification du comportement humain selon trois niveaux se distinguant par le type de processus cognitif qui les caractérise comme souligné par la Figure 1-7.

Le comportement basé sur des habiletés (*Skill-based behaviour*) permet l'exécution rapide de tâches programmées, à partir de la perception de signaux. Ces signaux sont directement perçus sans traitement cognitif. Ce type de comportement demande peu d'attention, il décrit des tâches habituelles qui sont le résultat d'un apprentissage et dont le traitement s'apparente à un automatisme.

Le niveau intermédiaire est occupé par le comportement basé sur des règles (*Rule-based behavior*). À ce niveau, l'humain applique les règles dont il dispose ou acquises avec l'expérience pour gérer une situation déjà rencontrée. Ce comportement utilise des signes mettant en rapport quelques caractéristiques de l'environnement et des activités à réaliser. Comme il s'agit d'une situation connue, l'humain réutilise des procédures prédéfinies apprises par exemple à la suite d'expériences similaires antérieures.

Le troisième niveau (*Knowledge-based behavior*) comprend les activités basées sur l'ensemble des connaissances de l'humain et sur ses capacités de raisonnement. À ce niveau, l'humain est amené à réagir à des situations ne pouvant être gérées aux deux niveaux précédents, en utilisant des symboles désignés comme des représentations mentales complexes.

L'humain adopte ce type de comportement lorsqu'il fait face à un problème qu'il n'a jamais rencontré et il doit inventer une solution en élaborant des hypothèses à partir de ses connaissances. Ce comportement nécessite un niveau élevé de ressources cognitives et attentionnelles.

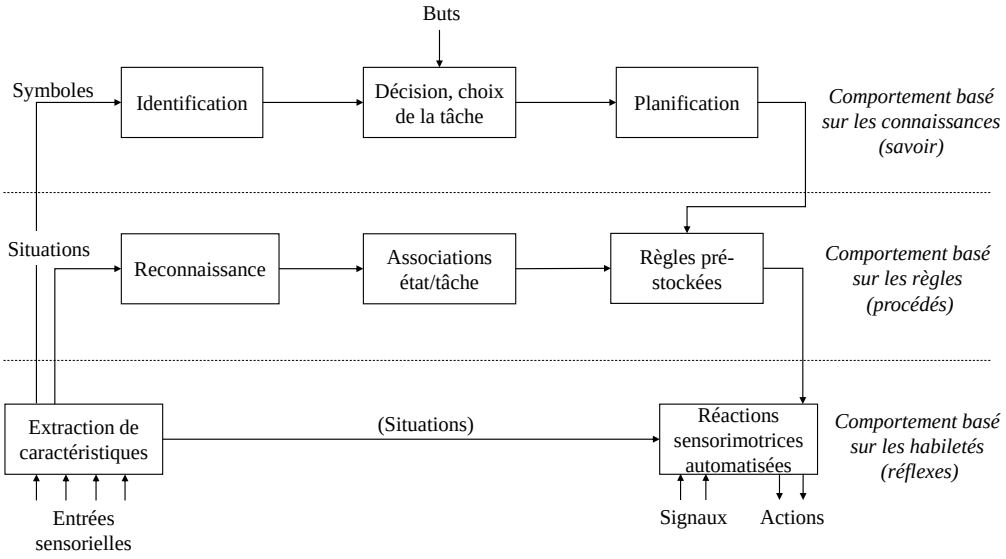


Figure 1-7 : Modèle du comportement humain proposé par Rasmussen traduit de (Rasmussen, 1983)

1.6.2 Modèle de Michon

Dans son modèle, Michon répartit l'activité humaine et plus exactement l'activité de conduite automobile, sur trois niveaux d'abstraction : le niveau stratégique, le niveau tactique et le niveau opérationnel (cf. Figure 1-8). Selon ce modèle, l'activité humaine est considérée comme un ensemble de tâches simultanées possédant des niveaux d'exigences cognitives et temporelles différents. De ce fait, plus une tâche demande à être exécutée rapidement, moins elle présente un coût cognitif élevé.

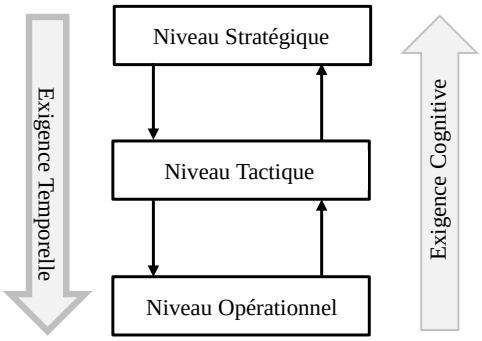


Figure 1-8 La répartition hiérarchique de l'activité selon Michon (Michon, 1985)

Au plus haut niveau, le niveau stratégique, la planification de l'itinéraire global à suivre est réalisée en déterminant les buts à long terme. À ce niveau, la tâche exige un investissement cognitif élevé et une exigence temporelle faible, c'est-à-dire que l'horizon temporel est lointain.

Au niveau intermédiaire, le niveau tactique, les différentes manœuvres à réaliser permettant de suivre l'itinéraire établi au niveau stratégique sont sélectionnées telles que le dépassement, l'arrêt à un passage piéton ou le choix d'une route définie précédemment. Dans certains cas le trajet planifié au niveau stratégique peut être mis à jour en fonction d'une manœuvre finalement sélectionnée. Au niveau tactique, le coût cognitif de la tâche est moins élevé qu'au niveau stratégique, mais son exigence temporelle est plus élevée.

Enfin au niveau opérationnel, les actions choisies au niveau supérieur sont mises en œuvre. Elles correspondent à toutes les actions temps réel, qu'exerce le conducteur sur le véhicule afin d'exécuter les manœuvres sélectionnées au niveau tactique, par exemple le guidage du véhicule sur la chaussée, la régulation de la vitesse, ou le freinage. Le coût cognitif de la tâche est faible et son exigence temporelle est très élevée.

Le modèle de Michon permet donc de décomposer la tâche principale à réaliser par un système homme-machine en sous-tâches. Cette approche est pertinente dans la démarche ergonomique de conception d'un système homme-machine ou homme-robot. Elle permet de mettre en évidence les différents niveaux de la tâche globale à réaliser et ainsi de définir l'allocation des tâches entre l'humain et la machine à chaque niveau d'abstraction et les interactions qui en résultent entre les niveaux.

1.7 Allocation de tâches et de fonctions

Suite à l'analyse cognitive des tâches, la décomposition en sous-tâches constitue l'une des étapes fondamentales de l'allocation de tâches dans un système-homme-machine (Miller & Parasuraman, 2003). Elle conduit à désigner qui des agents peut réaliser telle ou telle sous-tâche en tenant compte de leurs capacités. Dans le cas d'un agent humain, les ressources que la sous-tâche requiert peuvent être déterminées, mais aussi l'organisation dans laquelle il est positionné, ses responsabilités et son niveau d'autorité. Nous pouvons alors déduire les interfaces et si nécessaire les aides (mise en place d'un système d'aide à la décision) (Millot, Debernard, & Vanderhaegen, 2011). Pour un agent artificiel, les exigences demandées pour l'exécution d'une tâche représentent le cahier des charges pour la mise en œuvre de cet agent.

Dans la littérature, on parle soit de l'allocation de tâches (Millot, 1988) (Millot, 2014a)

ou bien de l'allocation de fonctions (Boy, 1998). Celles-ci comprennent des fonctions cognitives transformant la tâche en activité. Boy (1998) définit une analyse de fonctions pour en déterminer celles qui sont nécessaires à l'accomplissement d'une tâche. L'allocation de fonctions décompose les processus de résolution de la tâche en fonctions et les alloue aux agents impliqués dans cette tâche.

L'allocation de tâches ou de fonctions au sein d'un système homme-machine est statique ou dynamique. L'allocation de tâches statique est définie dès la conception du système homme-machine et l'allocation de tâches dynamique change en temps réel au cours de l'évolution du procédé, selon certains critères. Dans l'allocation dynamique de tâches, l'allocation initiale et les critères de l'allocation dynamique de tâches entre les agents, par exemple la charge de travail humaine, sont définis dès la conception du système homme-machine (Millot, 1988).

Plusieurs méthodes d'allocation de tâches existent, à savoir l'allocation de comparaison, l'allocation économique et l'allocation des restes (leftover) (Rouse, 1991). L'allocation de comparaison signifie que les tâches sont allouées en fonction des capacités des agents, un exemple connu d'une telle allocation est la liste proposée par Fitts : « MABA-MABA » (what « Men Are Better At » and what « Machines Are Better At ») (Fitts et al., 1951). À l'opposé, la méthode de l'allocation des restes consiste à automatiser toutes les tâches qui peuvent être automatisées, les humains devant accepter les autres, par défaut. L'allocation économique vise, quant à elle à automatiser toutes les fonctions les moins chères à automatiser relativement à la main d'œuvre humaine. Nous pouvons néanmoins nous interroger sur l'éthique d'une telle méthode dans un processus de conception centrée sur l'humain. Inagaki fait valoir que la méthode de comparaison est la meilleure stratégie (Inagaki, 2003). Ces stratégies d'allocation de tâches permettent de définir uniquement « qui fait quoi ». L'allocation de tâches dans ce cas est statique, la fonction étant allouée au même agent tout au long du processus.

Jordan (1963) admet le fait de devoir arrêter de comparer l'humain à la machine, mais propose néanmoins de continuer à définir ce que l'humain fait le mieux et ce que la machine fait le mieux. Il affirme que l'intérêt de la liste MABA-MABA est de souligner la complémentarité de l'humain et la machine. Sheridan (2002) souligne que pour utiliser la liste MABA-MABA, il faut disposer des données dépendantes du contexte. Il pense que ces données sont souvent indisponibles, notamment dans le cadre d'un environnement dynamique. La supériorité de l'humain sur la machine ou celle de la machine sur l'humain est difficilement vérifiable à tout moment. En effet, dans certains cas par exemple après plusieurs heures de travail, l'opérateur humain peut être fatigué. Inagaki (2003) pense que les critères décisionnels

« qui fait quoi » ne sont pas suffisants et que des considérations de « qui fait quoi et quand » doivent être prises en compte afin d'assurer une meilleure allocation de tâches ou de fonctions. C'est dans cette perspective que nous concevons l'allocation dynamique.

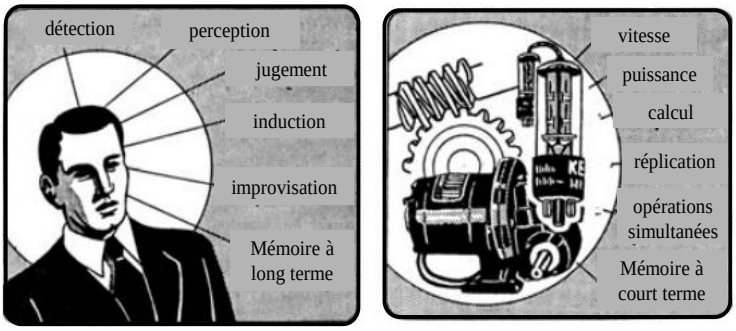


Figure 1-9 MABA-MABA (Fitts et al., 1951)

L'allocation dynamique de tâches dans un groupe d'agents peut être faite de plusieurs manières. Il faut d'abord désigner le responsable qui décide de quand et à qui réallouer (réaffecter) la tâche. En robotique, l'allocation dynamique de tâches au sein d'un groupe de robots a fait l'objet de plusieurs études. En référence à ces études, on distingue deux types d'allocation dynamique de tâches : centralisée et décentralisée (Horst & Noble, 2010). Dans l'allocation de tâches centralisée, un seul agent est responsable de l'allocation dynamique de tâches aux robots. Dans l'allocation de tâches décentralisée (distribuée), les robots ont une allocation initiale (qui peut provenir de l'allocation de tâches centralisée) et peuvent ensuite s'engager à changer leurs propres actions en fonction de leurs perceptions de l'environnement. L'approche centralisée permet à l'agent décideur de l'allocation de tâches d'avoir des informations complètes sur l'état de tout le système et donc de prendre des décisions optimales à tout moment. Dans l'approche décentralisée, des décisions individuelles sont prises et les agents ne disposent pas d'autant d'informations sur le système que dans l'approche centralisée, des décisions d'allocation sous-optimales peuvent alors être prises.

Selon quels critères peut-on juger la capacité d'un agent à exécuter une tâche ? De nombreux facteurs peuvent influencer les capacités des agents. Des facteurs liés à l'environnement de travail, par exemple un changement considérable de température qui peut affecter les propriétés de la tâche à réaliser et les capacités requises pour son exécution, mais aussi l'état physique des agents. Des facteurs liés aux agents, les capacités des agents peuvent être différentes en fonction du type de l'agent, humain ou robot, mais aussi suivant les propriétés individuelles de chaque agent comme l'expérience ou la capacité physique. D'autres facteurs sont liés à la tâche à réaliser, comme la difficulté et les ressources requises pour son

accomplissement.

1.8 Conclusion

Les robots mobiles de service actuels ont le potentiel d'aider les humains dans de nombreuses tâches et environnements différents. Les humains et les robots doivent travailler en équipe. Ils sont donc amenés à interagir et coopérer afin d'atteindre un but commun. La robotique mobile de service est confrontée au très grand défi de la coopération avec les humains. La répartition des fonctions et des tâches constitue le point de départ de la coopération au sein d'une équipe, elle est d'une importance considérable et contribue à l'amélioration de la performance de l'équipe. Le comportement et l'activité d'un agent (humain ou artificiel) peuvent dépendre de plusieurs facteurs. Il est donc important de réaliser la répartition et l'allocation de tâches de façon dynamique. L'allocation de tâches dynamique dans un système homme-machine revient à réaliser une adaptation des LoA. En d'autres termes, l'adaptation des LoA va permettre de tirer le meilleur parti de chaque agent tout en palliant leurs faiblesses respectives de façon dynamique et selon l'évolution de la situation. Ceci fait l'objet du deuxième chapitre.

2 LA COOPERATION HOMME-MACHINE, CADRE THEORIQUE

2.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de donner une vue d'ensemble des principes et concepts adoptés dans cette thèse pour la conception et la gestion de la coopération entre l'humain et le robot par le biais de l'adaptation des niveaux d'automatisation (LoA). Il repositionne l'importance de l'allocation dynamique de fonctions définie et pilotée par l'identification et le choix de LoA. Il propose ensuite un état de l'art sur les taxonomies de LoA proposées par de nombreux chercheurs dans différents domaines d'application. Finalement, il définit les principes et concepts fondamentaux de la coopération homme-machine permettant de répondre aux attentes et besoins identifiés dans le chapitre précédent en définissant les LoA adaptables.

2.2 Niveaux d'automatisation

Dans la littérature scientifique on trouve deux termes : niveaux d'automatisation et niveaux d'autonomie. Selon Kaber (2018) l'autonomie et l'automatisation sont deux termes complètement différents. L'automatisation fait référence à une automatisation spécifique à une fonction (précédemment réalisée par l'humain) et l'autonomie implique la viabilité, l'indépendance et l'auto-gouvernance d'un agent. Le concept de niveaux d'automatisation permet alors d'obtenir certains avantages de l'autonomie sans nécessiter une solution totalement autonome (Johnson et *al*., 2011). Ces terminologies semblent être employées de manière interchangeable notamment dans le domaine de l'ingénierie. Certains auteurs utilisent

le mot « automatisation » (Balfe, Sharples, & Wilson, 2015) (Beggiato et *al*., 2015), d'autres utilisent « autonomie » (Ruff, Narayanan, & Draper, 2002) (Zieba et *al*., 2010) et d'autres utilisent les deux (Wright et *al*., 2013). Nous avons constaté que le terme « autonomie » est souvent plus employé dans le domaine de la robotique. Néanmoins, en accord avec Vagia, Transeth, et Fjerdingen (2016), nous admettons l'existence d'une flexibilité dans la manière dont ces termes sont utilisés. Dans la suite du texte nous utilisons le terme « niveaux d'autonomie » uniquement pour présenter les taxonomies des auteurs ayant utilisé ce terme.

2.2.1 Concept et définition des niveaux d'automatisation

L'allocation de fonctions, l'interaction et la coopération entre les agents au sein d'un système homme-machine sont souvent exprimées par des niveaux d'automatisation. Ces derniers ont été définis et considérés dans différentes disciplines, notamment la psychologie, l'automatique et la robotique. Depuis les années 50, l'automatisation est au centre des discussions dans le monde du travail manuel, l'humain pouvant être remplacé par la machine dans l'exécution de plusieurs fonctions. Ce changement s'est traduit par une hausse de la productivité en terme d'énergie, d'amélioration de la qualité et de la précision. L'automatisation a permis à l'humain de passer du contrôle manuel à la supervision, mais en donnant lieu à des problèmes liés à l'automatisation exprimés dans le premier chapitre. C'est pourquoi, pour chaque cas d'application, des LoA adaptés au contexte doivent être définis et utilisés de manière à assurer un équilibre entre les capacités et les compétences de l'humain et de la machine.

Afin de bien comprendre le concept des LoA, il est indispensable de désigner les éléments qui les définissent, notamment en déterminant si leur conception et leur utilisation sont les mêmes ou différentes suivant les domaines d'application. Les LoA sont souvent décrits comme étant les degrés selon lesquels les tâches sont automatisées, depuis un niveau complètement manuel jusqu'à un niveau complétement automatique, en tenant pour acquis que le choix du bon niveau doit permettre d'améliorer la performance générale du système homme-machine. Le Tableau 2-1 représente une sélection de quelques définitions des LoA cités dans la littérature. C'est à partir de ces définitions qu'ont ensuite été proposées plusieurs taxonomies, la plupart du temps adaptées au contexte des études.

Tableau 2-1. Quelques définitions des niveaux d'automatisation/d'autonomie (LoA)

Référence	Définition
(Billings, 1997)	« Le niveau d'automatisation va du contrôle manuel à une opération largement autonome où le rôle humain est minime »
(Parasuraman et *al*., 2000)	« Le niveau d'automatisation est un continuum des opérations manuelle aux opérations entièrement automatiques »
(Johnson, Leen, & Goldberg, 2007)	« Le niveau d'autonomie fait référence à une répartition de la charge de travail entre l'humain et l'ordinateur »
(Frohm et *al*., 2008)	« Le niveau d'automatisation représente la répartition des tâches physiques et cognitives entre l'humain et la technologie, décrite comme un continuum de manuel à automatique »
(Vagia et *al*., 2016)	« Le niveau d'automatisation spécifie un degré différent d'automatisation d'une tâche. Cela implique que l'automatisation n'est pas tout ou rien, mais peut varier selon un continuum de niveaux intermédiaires, entre une performance entièrement manuelle et des conditions totalement autonomes »

2.2.2 Taxonomies des niveaux d'automatisation

Dans cette section nous allons présenter et comparer quelques taxonomies de niveaux d'automatisation/d'autonomie utilisés par des chercheurs dans différents domaines d'application (cf. section 2.2.2.1) et en particulier dans la robotique (cf. section 2.2.2.2). Le but est d'essayer de tirer des conclusions sur la définition des LoA.

2.2.2.1 Les niveaux d'automatisation dans différents domaines d'application

Les LoA présentés dans cette section sont regroupés dans un tableau (cf. Tableau 2-2). Cette même idée est utilisée par Vagia et *al*. (2016). La première ligne présente le domaine d'application et le nombre de LoA de chaque taxonomie. La première colonne de gauche (« propriété du LoA ») du Tableau 2-2 comprend des phrases décrivant le LoA. Les LoA partageant la même propriété sont disposés sur la même ligne. Ces niveaux sont classés verticalement suivant leurs auteurs, organisés par ordre chronologique (« référence »). Le nom exact attribué par les auteurs à chaque LoA est mentionné dans chaque case sous le numéro du LoA « entre guillemets ».

La littérature propose diverses taxonomies des LoA utilisées dans divers domaines d'application. La plus ancienne taxonomie est celle proposée par Sheridan et Verplank (1978). De nombreuses taxonomies ont pris cette définition pour base. Les auteurs ont proposé 10 niveaux d'automatisation et identifié 6 fonctions qu'un opérateur humain ou une machine pourrait faire dans le contexte de la prise de décision homme-machine.

Tableau 2-2 Quelques niveaux d'automatisation/d'autonomie (LoA) présentés dans la littérature

Nombre de LoA Et domaine d'application	10 LoA Avionique	5 LoA Automobile	5 LoA Manufacturier	10 LoA Contrôle dynamique	11 LoA Distribution d'énergie	3 LoA Ferroviaire	6 LoA Automobile
Réference / Propriété du LoA	(Sheridan & Verplank, 1978)	(Endsley & Kiris, 1995)	(Draper, 1995)	(Endsley & Kaber, 1999)	(Fereidunian et *al.*, 2007)	(Balfe et *al.*, 2015)	(SAE, 2016)
Contrôle manuel (Sans assistance)	LoA1	LoA1 « None »	LoA1 « Manual control »	LoA1 « Manual control »	LoA0	LoA1 « Low (manual operation) »	LoA0 « No automation »
Acquisition de données					LoA1		
Contrôle manuel avec assistance			LoA2 « Manual control with intelligent assistance »	LoA2 « Action support »			LoA1 « Driver assistance »
Exécution de la décision de l'humain				LoA3 « Batch processing »			
Proposition d'un ensemble d'alternatives	LoA2				LoA2		
Sélection de quelques alternatives	LoA3	LoA2 « Decision support »		LoA7 « Rigid system »	LoA3		
Contrôle partagé			LoA3 « Shared control »	LoA4 « Shared control »			
Contrôle négocié			LoA4 « Traded control »				
Assistance à la prise de décision et exécution de l'action				LoA5 « Decision support »			
Proposition d'une seule alternative	LoA4				LoA4		
Exécution de l'alternative proposée après approbation	LoA5	LoA3 « Consensual AI »		LoA6 « Blended decision making »	LoA5		
Accord d'un temps de veto avant l'exécution de l'alternative proposée	LoA6	LoA4 « Monitored AI »			LoA6		
Exécution de l'alternative proposée et nécessité d'information	LoA7				LoA7		
Exécution de l'alternative proposée et information en cas de demande	LoA8				LoA8		
Exécution de l'alternative proposée et décision d'information	LoA9			LoA8 « Automated decision making »	LoA9		
Contrôle supervisé			LoA5 « Supervisory control »	LoA9 « Supervisory control »		LoA2 « Medium (auto-routes) »	LoA2 « Partial automation »
Automatisation conditionnelle							LoA3 « Conditionnal automation »
Automatisation élevée							LoA4 « High automation »
Automatisation complète	LoA10	LoA5 « Full automation »		LoA10 « Full automation »	LoA10	LoA3 « High (ARS) »	LoA5 « Full automation »

Ils introduisent des fonctions telles que « *sélectionne*, *approuve*, *suggère*, *exécute*, *informe* et *décide* » (cf. Figure 2-1). Cette taxonomie offre une explication détaillée sur la manière dont l'humain et la machine sont supposés interagir. Elle traite l'allocation de fonctions entre l'humain et la machine à chaque LoA, ainsi que des informations communiquées à l'humain (feedback). L'échelle utilisée dans cette taxonomie reste limitée. En effet, la taxonomie prend en compte uniquement les fonctions de sortie liées à la prise de décision et à l'implémentation de l'action. En particulier, elle ne considère pas spécifiquement le partage de fonctions d'entrée liées à la prise d'informations et à leur analyse.

1. La machine ne fournit aucune assistance, l'humain fait tout.
2. La machine propose un ensemble complet d'actions possibles, et
3. Sélectionne quelques-unes, ou
4. En suggère une, et
5. Exécute cette suggestion si l'humain approuve ou
6. Attribue à l'humain un temps restreint de veto avant une exécution automatique, ou
7. L'exécute automatiquement, puis informe nécessairement l'humain, ou
8. L'informe après l'exécution de l'action seulement si l'humain le demande, ou
9. Informe l'humain après l'exécution si elle, la machine, le décide
10. La machine décide tout et agit de manière autonome, ignorant l'humain

Figure 2-1 Niveaux d'automatisation proposés par (Sheridan & Verplank, 1978)

Après de nombreuses années, Endsley et Kiris (1995) ont porté un intérêt à la question de la performance de l'humain lorsqu'il est hors de la boucle de contrôle. Le principal objectif de leur étude était d'identifier des niveaux d'automatisation permettant de maintenir l'humain suffisamment dans la boucle de contrôle au cours du fonctionnement normal du système.

Dans leur étude, les auteurs ont utilisé 5 niveaux d'automatisation similaires aux niveaux 1, 3, 5, 6 et 10 de la taxonomie proposée par Sheridan et Verplank.

À cette même année, Draper (1995) a utilisé une taxonomie de 5 niveaux d'automatisation dans le domaine manufacturier avec le concept de niveaux de contrôle : *contrôle supervisé* (la machine réalise toutes les fonctions de façon autonome et l'humain reste hors de la boucle de contrôle si rien d'inattendu n'arrive), *contrôle négocié* (l'humain et la machine sont responsables en permanence des sous-tâches à réaliser et chacun peut avoir le contrôle total de la tâche), *contrôle partagé* (l'humain et la machine partagent les tâches à contrôler), *contrôle manuel avec assistance* (la machine peut guider l'humain, par exemple sous forme de restrictions de mouvement) et le *contrôle manuel* (semblable au premier niveau de la taxonomie

de Sheridan et Verplank).

En s'appuyant sur les travaux de Sheridan et Verplank, Endsley et Kaber (1999) ont proposé une taxonomie en 10 niveaux. Cette taxonomie s'intéresse aux fonctions d'entrée comme par exemple la manière dont la machine acquiert les informations et propose des options (analyse des informations). Le principal avantage de cette taxonomie est qu'elle est organisée et classée suivant 4 fonctions génériques : *suivi* (surveillance-numérisation), *génération* (générer et formuler des options pour atteindre les objectifs), *sélection* (choisir et décider d'une option) et *mise en œuvre* (implémenter et interpréter l'option choisie). À chaque LoA, cette taxonomie décrit en détails « qui » (de l'humain et de la machine) fait « quoi » (fonction) et aussi qui des deux agents a l'autorité. Cette taxonomie comprend deux niveaux supplémentaires non utilisés par les précédentes taxonomies :

- le *traitement par lots* : l'humain génère et sélectionne les options à exécuter, qui sont ensuite communiquées à la machine pour être exécutées automatiquement.
- et *l'aide à la décision avec l'exécution automatique de l'action* : la machine génère une liste d'alternatives parmi lesquelles l'humain peut sélectionner ; l'humain peut également générer ses propres alternatives, ou encore, une alternative peut être sélectionnée par l'humain et mise en œuvre par la machine.

Fereidunian et *al*. (2007) ont proposé une extension de la taxonomie de Sheridan et Verplank. Ils ont identifié 11 niveaux d'automatisation au lieu de 10, dans laquelle le niveau 1 de la taxonomie de Sheridan et Verplank d'origine forme un nouveau niveau 0 et un nouveau niveau 1 est ajouté : la machine acquiert la date du processus « *acquisition de données* ».

En s'appuyant sur leurs approches précédentes, Parasuraman et *al*. (2000) ont mis en évidence les différents aspects liés aux interactions homme-machine. Les auteurs ne défissent pas explicitement des LoA comme ceux présentés jusqu'à présent. En revanche, ils proposent un modèle basé sur les 4 fonctions du processus du traitement de l'information : *prise d'informations*, *analyse d'informations*, *prise de décision* et *implémentation d'action*. Ces fonctions sont appelées type d'automatisation et peuvent être automatisées à des niveaux différents le long d'un continuum allant d'entièrement manuel à entièrement automatisé (cf. Figure 2-2).

- *L'automatisation de la prise d'informations* réside dans la détection et l'acquisition des données, y compris leur mise en forme. Ce type d'automatisation prend en charge les processus sensoriels et perceptuels humains et peut inclure des systèmes d'observations

de l'environnement tels que les caméras infrarouges et les radars.

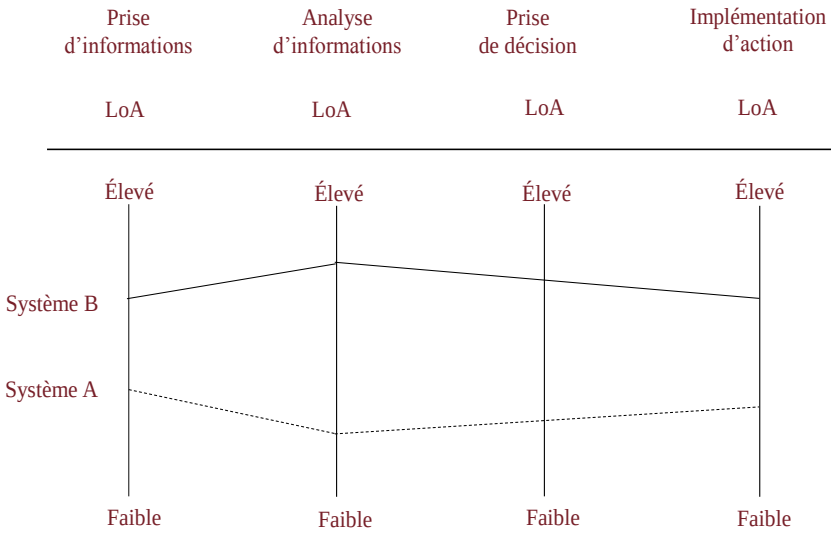


Figure 2-2 Définitions du niveau d'automatisation (LoA) de deux systèmes en l'évaluant pour chaque fonction principale d'après (Parasuraman et *al.*, 2000)

- *L'automatisation de la phase d'analyse d'informations* a pour but d'automatiser les fonctions similaires à la fonction cognitive humaine comme le jugement et la mémoire. Ce genre d'automatisation peut fournir des prédictions ou fournir une synthèse à l'humain des options possibles afin d'atteindre l'objectif.
- *L'automatisation de la prise de décision* choisit la décision. Par exemple, l'automatisation peut décider de la trajectoire optimale pour éviter les obstacles et atteindre un objectif.
- *L'automatisation de l'implémentation de l'action* tend à automatiser la mise en œuvre de l'action choisie. Par exemple, le suivi automatique de la trajectoire optimale choisie.

Par la suite, en se basant sur ce modèle, Balfe et *al*. (2015) ont défini un modèle de niveaux d'automatisation approprié au domaine de la signalisation ferroviaire. Les auteurs ont identifié 3 niveaux d'automatisation : faible (*contrôle manuel*), moyen (*contrôle supervisé*) et élevé (*automatisation complète*).

Dans le domaine de l'automobile, la société des ingénieurs de l'automobile (SAE : Society of Automotive Engineers) distingue 5 niveaux d'automatisation de la conduite allant d'un contrôle manuel (*sans automatisation*) à une *automatisation complète*. Le niveau 1 (*conduite assistée*) correspond au niveau 2 « *contrôle manuel avec assistance* » des taxonomies de Draper, Endsley et Kaber présentées précédemment. À ce niveau, des outils d'assistance appelés ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) implémentés dans le véhicule, assiste de temps en temps le conducteur dans certaines tâches telles que la régulation de vitesse. Le niveau 2 (*automatisation partielle*) est traduit par un contrôle supervisé (niveau 5 et niveau 9

des taxonomies de Endsley et Kiris et de Draper respectivement). À ce niveau, le véhicule est capable d'exécuter seul certaines tâches telles que l'accélération et le guidage. Mais le conducteur doit rester engagé dans la tâche de conduite et surveiller l'environnement à tout moment. Au niveau 3 (*automatisation conditionnelle*), le véhicule peut aussi bien exécuter seul certaines tâches et assurer seul le contrôle de son environnement. Le conducteur doit cependant être en mesure de reprendre le contrôle à la demande du véhicule. Au niveau 4 (*automatisation élevée*), le véhicule peut aussi bien exécuter certaines tâches et assurer le contrôle de son environnement dans certaines conditions sans que le conducteur n'ait besoin de reprendre le contrôle du véhicule.

2.2.2.2 Les niveaux d'automatisation en robotique

Dans le domaine de la robotique, il est commun d'utiliser le terme d'autonomie ou les niveaux d'autonomie du robot au lieu de niveaux d'automatisation. L'autonomie dans la littérature robotique est également représentée comme un continuum. Le continuum, souvent compris entre *contrôle manuel* (téléopération) et *niveau autonome*. Le Tableau 2-3 est basé sur le même concept que celui du Tableau 2-2 et présente les niveaux d'automatisation/d'autonomie utilisés dans le domaine de la robotique. Les phrases de couleur bleue dans la première colonne gauche du tableau désignent des LoA comparables à ceux déjà présentés dans le Tableau 2-2. Le nombre de niveaux de chaque taxonomie est donné sous sa référence.

Milgram, Rastogi, et Grodski (1995) ont défini 5 niveaux d'autonomie dans le cadre du contrôle d'un télé-robot allant d'un niveau *manuel* (sans assistance) à un niveau *complètement autonome* . Le niveau 3 de cette taxonomie correspond au niveau 2 des taxonomies de Draper (*Manual control with intelligent assistance*) et de Endsley et Kaber (*Action support*) et au niveau 1 d'automatisation de conduite (*Driver assistance*). Le niveau 4 correspond au contrôle supervisé retrouvé aussi dans les taxonomies de Draper (1995) et de Endsley et Kaber (1999). Dans sa taxonomie, Milgram intègre le niveau de téléprésence qui permet de donner à l'humain les moyens pour réaliser des opérations à distance, comme s'il était réellement présent sur le terrain.

Quelques années plus tard, Clough (2002) a présenté une taxonomie avec une application spécifique sur les drones. Dans son approche l'autonomie est divisée en 4 niveaux différents : un niveau *manuel* (drone piloté à distance), un niveau où le drone *effectue la tâche de pilotage et demande la permission* de l'humain pour faire d'autres tâches, telles que prendre une certaine

direction (drone opéré à distance), un niveau de *contrôle supervisé* (drone supervisé à distance) et un niveau *complètement autonome* (drone autonome).

Tableau 2-3 Quelques taxonomies de niveaux d'automatisation/d'autonomie proposés dans la littérature robotique

Référence / Propriété du LoA	(Milgram et *al.*, 1995) (5 LoA)	(Clough, 2002) (4 LoA)	(Ruff et *al.*, 2002) (3 LoA)	(Zieba et *al.*, 2010) (4 LoA)	(Mi & Yang, 2013) (4 LoA)	(Wright et al., 2013) (3 LoA)
Contrôle manuel (Sans assistance)	LoA1	LoA1 « Remotly piloted »	LoA1 « Manual »	LoA1 « Mode 0 »	LoA1 « Manual operation »	LoA1 « Manual »
Téléprésence	LoA2					
Exécution des décisions de l'humain	LoA3 « Director /Agent »			LoA2 « Mode 1 »		
Contrôle partagé						LoA2 « Semi-autonomous »
Prise de décision à partir d'instructions avec probabilité d'information					LoA2 « Human-Oriented Semi-Autonomy »	
Proposition d'une action et son exécution après approbation			LoA2 « management-by-consent »			
Execution en parallèle de deux actions : l'une sans approbation et l'autre avec approbation		LoA2 « Remotly operated »				LoA3 « Fully Autonomous »
Accord d'un temps de veto avant l'exécution d'une action proposée			LoA3 « management-by-exception »	LoA3 « Mode 2 »		
Prise de décision et son exécution sans instructions avec nécessité d'information					LoA3 « Machine-Oriented Semi-Autonomy »	
Contrôle supervisé	LoA4	LoA3 « Remotly supervised »				
Robot autonome	LoA5	LoA4 « Fully autonomous »		LoA4 « Mode 3 »	LoA4 « Fully Autonomy »	

Pour la supervision et le contrôle à distance des drones, Ruff et *al.*, (2002) ont utilisé des niveaux d'automatisation basés sur la taxonomie proposée par Rouse (1983) et qui correspondent aux LoA 1, 5 et 6 de la décision et de l'action de Sheridan et Verplank (1978) respectivement.

Zieba et *al.* (2010) se sont basés sur le modèle de Parasuraman et *al.* (2000) pour définir les niveaux d'automatisation exprimés en terme de modes d'autonomie utilisés pour le contrôle d'un robot virtuel dans un environnement simulé. Leur système utilise 4 modes (allant de 0 à 3). Le mode 0 est un mode de téléopération. Le mode 1 ressemble au 3ème niveau de la

taxonomie de Milgram : l'humain décide de toutes les actions que le robot doit réaliser automatiquement. Le mode 2 correspond au 6ème niveau de la décision et de l'action de Sheridan et Verplank. Dans le mode 3 le robot agit en toute autonomie.

Mi et Yang (2013) ont utilisé 4 niveaux d'automatisation : *opération manuelle, semi-autonome contrôlé par l'humain, semi-autonome contrôlé par la machine,* et *autonomie complète*). Ces niveaux définissent les rôles généraux des opérateurs humains et d'une flotte de drones. Le niveau *semi-autonome contrôlé par l'humain* permet à la flotte de drones de prendre des décisions à partir des instructions de l'humain, avec possibilité d'informer ce dernier. Au niveau *semi-autonome contrôlé par la machine* la flotte de drones est capable de prendre des décisions et d'exécuter des actions sans instructions et doit nécessairement informer l'humain.

Dans une étude, Wright et *al*. (2013) ont désigné 3 niveaux d'autonomie d'un RobotLeader (agent intelligent) conçu pour assister un opérateur humain dans la gestion d'un groupe de robots. Les niveaux sont : le niveau *manuel* (sans assistance du RobotLeader), le niveau *semi-autonome* (maintien de distance entre les robots) et le niveau *autonome* (maintien de distance entre les robots et planification de l'itinéraire). Au niveau autonome, le RobotLeader gère la distance entre les robots sans l'intervention de l'humain et suggère des changements d'itinéraire en cas d'évènements environnementaux. Le RobotLeader modifie l'itinéraire avec l'approbation de l'humain. Ce niveau ressemble au niveau 2 de la taxonomie de Clough.

Pour définir des LoA appropriés au domaine de la robotique, notamment à la robotique mobile, Beer et *al*. (2014) proposent de suivre le même concept que celui du modèle de Parassuraman et d'automatiser à des niveaux différents le long d'un continuum (de la téléopération à complètement autonome) chaque fonction du modèle sentir-planifier-agir. Ce dernier représente une séquence de fonctions qu'un robot réalise lors de son interaction avec l'environnement. Premièrement le robot effectue la fonction qui se rapporte à l'élaboration (ou acquisition) de l'information et la collecte de données à partir de l'environnement de travail en utilisant des capteurs (capteur de température et capteur ultrason par exemple). Ensuite le robot utilise les données obtenues dans la première fonction pour planifier les actions nécessaires afin d'atteindre son objectif. Enfin, le robot met en œuvre une action en utilisant ses actionneurs. À la fin de chaque séquence le robot répète le même processus jusqu'à la fin de sa mission.

2.2.2.3 Synthèse

À partir de la littérature sur les LoA analysés, nous pouvons extraire quelques similitudes

entre les taxonomies utilisées par les différents chercheurs, comme par exemple le nombre de niveaux utilisés. La plupart des LoA présentés, sont compris entre le LoA *complètement manuel* (sans assistance) et le niveau *autonome* (automatisation complète). Des LoA intermédiaires similaires peuvent aussi être retrouvés dans les différentes taxonomies. Hormis ces quelques similitudes, les LoA sont définis d'une manière peu normative. En effet, la plupart des niveaux sont formalisés de différentes manières et sont hétérogènes selon les définitions et les domaines d'application. Cependant, même les taxonomies utilisées pour les mêmes types d'applications peuvent varier considérablement (*e.g.* les taxonomies présentées dans (Mi & Yang, 2013) et (Wright et *al*., 2013) utilisées pour une application dans le domaine robotique). On constate également que la plupart des taxonomies existantes sont conçues pour des tâches spécifiques prédéfinies et qu'elles pourraient donc difficilement être transposées à d'autres systèmes. Il existe une large variété d'applications sur lesquelles les différentes taxonomies peuvent être appliquées. Chaque application a ses propres besoins. Il est donc important de bien définir les LoA qui répondent le mieux aux besoins. Il n'existe pas de LoA bon ou mauvais, chaque concepteur d'un système homme-machine est libre de choisir les LoA, ou d'en créer de nouveaux qui correspondent à ses besoins.

Les travaux menés sur les taxonomies de LoA ont défini et utilisé des LoA statiques, c'est-à-dire que le LoA du système homme-machine reste fixe tout au long du processus. Toutefois, l'expérience opérationnelle acquise avec des LoA statiques a montré que cette approche provoque une charge de travail déséquilibrée et un manque de connaissance de la machine par l'opérateur humain (Billings, 1996) (Sarter, Woods, & Billings, 1997). Afin de remédier à ces conséquences négatives et compte tenu de l'importance de l'allocation dynamique de fonctions exprimée dans la section 2.2.1, certains chercheurs ont identifié la nécessité d'une approche mettant en place une répartition dynamique des fonctions entre l'humain et la machine, par le biais d'une adaptation en temps réel des LoA. Cette approche peut tenir compte par exemple de l'état et de la performance de l'opérateur humain, ou de la demande explicite de celui-ci.

Dans ce contexte, la littérature propose deux principales approches en fonction de qui est responsable du changement des LoA, l'humain ou la machine, ces derniers peuvent être respectivement « adaptables » ou « adaptatifs ».

2.2.3 Niveaux d'automatisation adaptatifs ou adaptables

Les LoA adaptatifs (ou l'automatisation adaptative) s'apparentent au changement des LoA par la machine et les LoA (ou l'automatisation adaptable) au changement des niveaux par

l'humain (Hancock & Scallen, 1996) (Sauer & Chavaillaz, 2017). Dans des travaux précurseurs, Millot (1988) a défini la répartition dynamique des tâches entre l'humain et la machine selon 2 modes : un mode *explicite* où l'humain répartit les tâches entre lui-même et la machine (que l'on peut apparenter à la forme adaptable) et un mode *implicite* où un algorithme répartit les tâches (forme adaptative).

2.2.3.1 Niveaux d'automatisation adaptatifs

Etant donné le contexte dynamique de la plupart des applications dans les systèmes homme-machine, l'utilisation de LoA qui s'adaptent aux changements de situation s'avère important. Néanmoins, un mauvais choix du LoA peut provoquer une détérioration des performances du système homme-machine. Dans le cas des LoA adaptatifs, la machine doit être conçue de façon à pouvoir adapter automatiquement le LoA en fonction de la situation ou de l'état de l'humain. Dans cette perspective, par exemple suite à une baisse de capacité de la machine, celle-ci devrait être en mesure de passer à un LoA inferieur en délégant davantage ou même tout le contrôle à l'humain. À l'inverse, si l'humain a une charge de travail trop élevée, la machine peut choisir un LoA plus élevé afin qu'elle soit moins dépendante de l'humain. De nombreux chercheurs se sont intéressés à l'étude de l'impact de l'automatisation adaptative sur les performances de l'humain (Kaber & Endsley, 2004) (Wilson & Russell, 2007) (Nguyen, Sentouh, & Popieul, 2018).

Différentes recherches ont souligné l'intérêt des LoA adaptatifs. Parasuraman, Cosenzo, et De Visser (2009) ont constaté que l'automatisation adaptative a des effets bénéfiques sur les performances de l'humain dans le cadre de la supervision des drones par rapport à l'automatisation statique ou au niveau complètement manuel. L'automatisation adaptative a amélioré la SA et, dans une moindre mesure, la charge de travail de l'opérateur humain. De même, Moray et *al*. (2000) ont montré que la performance en terme de gestion de défaillances (exprimée en probabilité d'accidents) des opérateurs humains était meilleure lorsque l'automatisation adaptative était utilisée, en comparaison avec un contrôle manuel.

L'approche adaptative peut utiliser différentes techniques pour le changement automatique des LoA (Parasuraman et *al*., 1992). Des études empiriques utilisant plusieurs de ces techniques ont été réalisées. Elles sont basées sur différents critères, à savoir, les évènements critiques (Moray et *al*., 2000), la performance (Calhoun et *al*., 2012), l'état psychophysiologique (Aricò et *al*., 2016) et le modèle de la charge de travail cognitive de l'opérateur humain (Giele et *al*., 2015). Cependant, ces techniques peuvent présenter des

inconvénients. Les techniques basées sur la détection des évènements critiques ne tiennent pas en compte de l'état de l'opérateur humain, ce qui peut donner lieu à des changements de LoA quand il n'est ni nécessaire ni approprié de le faire. Un moyen de surmonter cette limitation consiste à considérer les variations de performance de l'opérateur humain à la place ou en complément des évènements critiques. Surveillée en temps réel, une dégradation de performance peut être considérée comme un signe de charge de travail excessive qui demande une augmentation du LoA. L'un des inconvénients de cette approche est que toutes les tâches ne permettent pas une mesure de performance en temps réel (Salas, Cooke, & Rosen, 2008). Certaines techniques utilisent des mesures psychophysiologiques obtenues à l'aide de divers outils, comme l'oculomètre pour mesurer les mouvements de l'œil, ou encore des outils neurophysiologiques comme l'électroencéphalogramme (EEG). Ces techniques peuvent cependant être inadaptées à certains domaines d'application, les appareils de mesure utilisés peuvent être encombrants et limiter les mouvements des opérateurs humains. Les techniques basées sur le modèle de la charge de travail cognitive de l'opérateur humain ont révélé d'intéressants résultats, mais il a été montré que la charge cognitive n'est pas un critère suffisant pour assurer une performance optimale du système homme-machine et qu'il faut donc prendre en compte plus de critères (Giele et *al.*, 2015).

Il convient de noter que dans la majorité des recherches sur les LoA adaptatifs, les mesures sont prises au niveau individuel plutôt que sur tout le système homme-machine. Par exemple, les mesures de performances ne concernent souvent que l'opérateur humain, alors que les performances de la machine influent également sur les performances globales.

Compte tenu des différents inconvénients, il serait donc plus judicieux, en fonction des besoins d'un système homme-machine, de pouvoir définir et utiliser plusieurs critères au lieu d'un seul, tout en garantissant la performance du système homme-machine global.

Cependant, les LoA adaptatifs soulèvent la question de l'acceptabilité des opérateurs humains. En effet, de nombreux opérateurs humains, en particulier ceux qui attachent une grande valeur à leur expertise pour le contrôle manuel, peuvent ne pas accepter l'idée qu'un système automatisé décide quand et quel type d'automatisation utiliser. En plus du risque d'absence d'acceptabilité par l'humain, les LoA adaptatifs risquent de provoquer le phénomène de « automation surprise », qui représente une action (*i.e.* un changement automatique du LoA) inattendue par l'opérateur humain (Sarter et *al.*, 1997). Ce problème de l'imprévisibilité du système automatisé peut avoir des conséquences sur les performances de l'opérateur humain. Un système adaptatif peut aussi nuire davantage à la prise de conscience de la situation de

l'opérateur humain puisqu'une décision de la machine peut modifier une situation sans que les opérateurs humains ne s'en aperçoivent.

2.2.3.2 Niveaux d'automatisation adaptables

Les LoA adaptables peuvent éviter ou limiter certains des inconvénients identifiés précédemment puisque l'opérateur humain reste en charge du choix du LoA à utiliser et à quel moment. Il peut en résulter une meilleure connaissance de la situation et du système, une utilisation appropriée de l'automatisation et une acceptabilité accrue. Des études sur la supervision humaine de plusieurs drones ont montré l'intérêt de l'automatisation adaptable (Parasuraman et *al*., 2005). Miller et Parasuraman (2007) ont encouragé le recours aux LoA adaptables en proposant ce qu'ils appellent une « approche par délégation ». Pour cette approche, l'opérateur humain délègue des tâches à la machine quand il le décide et reçoit par retour d'informations les performances du système. Dans leur étude Li et *al*. (2013) ont comparé les deux approches d'adaptation des LoA dans le cadre de la téléopération spatiale. Les auteurs ont conclu que les opérateurs humains ont préféré l'approche adaptable en raison du sentiment de contrôle accru et de l'incompréhension due aux changements de LoA inattendus lors de l'approche adaptative. Les résultats de cette étude ont de plus révélé que les performances avec des LoA adaptables étaient supérieurs à celles obtenues avec des LoA adaptatifs. Dans le cadre de la supervision d'une flotte de drones, Kidwell et *al*. (2012) ont mené une étude empirique dans laquelle ils comparent les performances des opérateurs humains en automatisation adaptable et automatisation adaptative. Les résultats de cette étude ont souligné que les LoA adaptables permettent d'augmenter la performance de l'opérateur humain en terme de détection de changements de situation, comparativement aux LoA adaptatifs basés sur la performance. Les auteurs de cette étude ont suggéré que si l'opérateur humain change par lui-même les LoA, il est plus conscient de la situation et aussi plus attentif aux évènements imprévus. Les auteurs pensent également que des facteurs liés à la personnalité de l'opérateur humain peuvent influencer le choix et le changement des LoA.

Toutefois, le fait que l'opérateur humain soit responsable de l'adaptation des LoA lui ajoute une tâche supplémentaire et augmente sa charge de travail (Kirlik, 1993). Par conséquent, les LoA adaptables doivent être conçus de manière à éviter une charge de travail supplémentaire pour l'opérateur humain lors de la prise de décision en matière d'allocation de tâches.

2.2.3.3 Synthèse

La synthèse des avantages, inconvénients et des effets sur les performances des deux

approches de l'adaptation des LoA révèle que celles-ci restent sensibles au contexte. À priori on ne peut pas affirmer qu'une des deux approches n'est suffisante et appropriée pour assurer l'adaptation efficace des LoA aux différentes situations. Un compromis doit donc être trouvé entre l'imprévisibilité et le manque de l'acceptabilité de la part des opérateurs humains pour les LoA adaptatifs et une charge de travail accrue lors de l'utilisation des LoA adaptables (Miller & Parasuraman, 2007). Comme alternative à ces deux approches, de Tjerk, Henryk et Neerincx (2010) proposent l'approche hybride dans laquelle un certain nombre de facteurs indépendants sont utilisés.

Afin de pouvoir utiliser cette approche hybride, il faut d'abord bien définir et concevoir les approches « adaptable » et « adaptative ». On estime que la conception des LoA adaptatifs efficaces repose principalement sur la définition de critères d'adaptabilité permettant d'assurer une meilleure coopération entre l'humain et la machine et ainsi garantir la performance du système homme-machine. Les critères d'adaptabilité peuvent être dépendants du contexte et des besoins de chaque système homme-machine. Pour cela, concevoir et tester les LoA adaptables est une étape primordiale afin de pouvoir en extraire les critères d'adaptabilité convenables au système homme-machine étudié. Mais dans un premier temps une étude préliminaire permettant de définir les LoA adaptables s'avère indispensable.

Rendre les LoA adaptables vise à tirer le meilleur parti de l'humain et de la machine tout en palliant leurs faiblesses respectives de façon dynamique et selon l'évolution de la situation. L'organisation, la coopération et le partage bien définis de fonctions à réaliser constituent les éléments principaux pour garantir l'efficacité d'un système homme-machine.

Les LoA doivent donc prendre en compte les interactions et la coopération entre l'humain et la machine. Il est vrai que pour quelques LoA utilisés par certains chercheurs, les interactions entre l'humain et la machine sont définies mais pas d'une manière suffisamment claire et précise. C'est dans ce contexte qu'on s'intéresse aux concepts et principes de la coopération homme-machine afin de bien concevoir et définir les LoA adaptables d'un système homme-machine, et en particulier d'un système homme-robot.

2.3 Coopération homme-machine

Les concepts et principes théoriques de la coopération homme-machine résultent d'une synthèse d'études et d'échanges entre chercheurs de différentes disciplines menés dans différents domaines d'application (ergonomie, psychologie, automatique...). Historiquement, tout a commencé avec l'idée d'apporter une aide flexible à un opérateur humain, c'est-à-dire

lui offrir une aide quand il en a besoin, et de stopper cette aide dans le cas contraire (Millot, 1988). Les principes de la coopération homme-machine ont été appliqués dans plusieurs domaines tels que, le contrôle aérien (Hoc & Lemoine, 1998), l'automobile (Sentouh et *al*., 2018) et la robotique (Pacaux-Lemoine et *al*., 2011). L'objectif de ces études réside en la définition d'une approche générique de la coopération qui pourrait être utilisée pour la conception et l'évaluation des systèmes homme-machine.

Une définition de la coopération homme-machine est donnée par Millot et Hoc (1997) adaptée de Piaget (1965). Un groupe d'agents est en situation de coopération si ces deux conditions sont vérifiées :

- « chacun poursuit ses buts en gérant les interférences avec les buts, les ressources et les procédures de l'autre agent »,
- « chacun essaie de gérer ces interférences de façon à faciliter sa tâche et celle de l'autre en fonction de la tâche commune ».

Dans cette définition, le terme « interférences » fait référence à toutes les interactions entre les agents. Elles peuvent être positives (facilitatrices) ou négatives.

Un agent en situation de coopération est appelé « agent coopératif ». Un modèle de l'agent coopératif est défini ci-dessous.

2.3.1 Modèle de l'agent coopératif

Le terme générique « agent » désigne aussi bien un humain qu'une machine. Chaque agent coopératif possède deux attributs : - un *Savoir-Faire (SF)* qui indique ses capacités à communiquer et à interagir avec son environnement, par exemple contrôler un procédé, et - un *Savoir-Coopérer (SC)* qui lui permet d'interagir et de coopérer avec les autres agents impliqués dans le contrôle du même processus (Millot & Lemoine, 1998) (cf. Figure 2-3).

Le SF d'un agent concerne uniquement le contrôle du procédé, et non les éventuelles communications ou interactions avec les autres agents. Il est composé de deux parties : le SF interne et le SF externe. Le SF interne correspond aux capacités et compétences d'un agent pour la résolution de problème. Le SF interne dépend principalement des connaissances, des règles et des compétences de l'agent pour contrôler le processus en référence aux 3 comportements basés respectivement sur des habiletés, des règles ou des connaissances du célèbre modèle de Rasmussen (1983). Il est donc notamment lié à l'expertise, l'expérience, la charge de travail et l'attention de l'agent. Le SF interne concerne donc l'analyse de l'information reçue sur le

processus et sur l'environnement dans le but de prendre une décision concernant le contrôle du procédé.

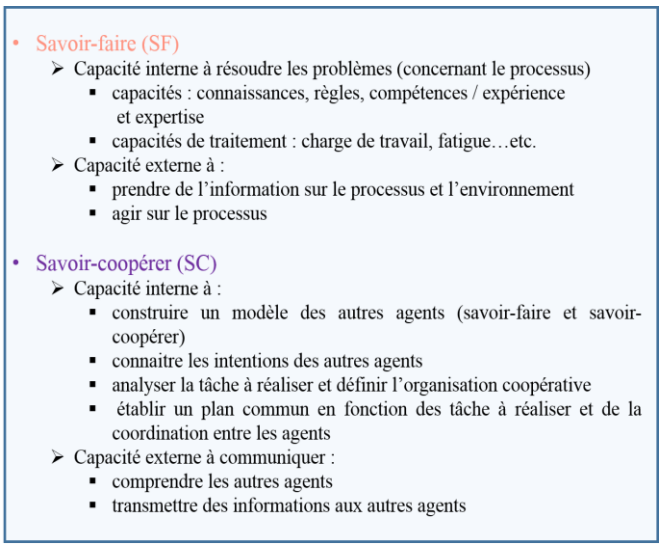


Figure 2-3- Modèle d'agent coopératif (Millot & Pacaux-Lemoine, 2013)

La prise d'informations et la mise en œuvre de la décision prennent part dans le SF externe. Ce dernier est associé à la capacité d'un agent à obtenir des informations sur le procédé et sur l'environnement et de pouvoir agir sur le procédé. Le SF externe permet de prendre en compte les aspects ergonomiques des interfaces, concernant la visibilité, la lisibilité et la compréhension des données. Les agents humains doivent être vigilants quant à leur capacité à obtenir les informations sur le procédé, ainsi que s'entraîner sur la réalisation de la tâche et l'évaluation de la situation.

Bien que moins complets que les modèles issus de la psychologie cognitive, les SF interne et externe peuvent être synthétisés par les quatre fonctions du modèle du processus cognitif du traitement de l'information proposé par Parasuraman et *al*., (2000). Cette simplification permet en effet d'avoir un modèle similaire entre l'humain et la machine et ainsi de penser plus facilement l'allocation de fonctions.

Très souvent, une tâche est réalisée par un groupe d'agents, autrement dit lorsque plusieurs agents sont impliqués dans le contrôle du même procédé. Ils pourraient être considérés comme des ressources indépendantes sans interactions excepté celles de leur activité, ce qui est rarement le cas dès que l'humain est impliqué. Dans le cadre de cette thèse, les agents sont cognitifs et coopératifs. Ces capacités sont définies par leur Savoir-Coopérer (SC).

Le SC est aussi divisé en deux parties, interne et externe. Le SC interne représente la capacité d'un agent à construire un modèle des autres agents de façon à comprendre leurs

intentions, ce qui peut permettre notamment de faciliter la coopération. Autrement dit, le SC permet à un agent d'obtenir des informations sur les autres agents et de déduire leur SF et SC. Le SC externe concerne la capacité d'un agent à recueillir des informations sur les autres agents et de leur transmettre des informations. Cela peut être réalisé par le biais d'observations, de leurs mouvements et de leurs émotions, mais aussi par communication verbale, ou encore par des échanges par l'intermédiaire d'une interface interactive. La coopération entre les différents agents se réalise au moyen d'un partage d'informations sur l'état du procédé et l'implication de l'ensemble des agents via un espace de travail commun.

2.3.2 Espace de travail commun

L'Espace de Travail Commun (ETC) a pour objectif de faciliter les interactions et les échanges d'informations entre les agents coopératifs. Lors de l'accomplissement d'une tâche, les agents coopératifs se constituent un référentiel commun représentant la situation courante en général en fonction de plusieurs attributs : informations, problèmes, stratégies et solutions (Lemoine, 1998). Ce référentiel permet de détecter d'éventuelles situations anormales dans l'activité d'un ou plusieurs agents. L'ETC soutient la coopération entre l'humain et la machine en facilitant la perception et la compréhension de l'état du procédé ainsi que les activités et les intentions de l'humain et de la machine. À titre d'exemple, une application sur la reconnaissance robotique a été réalisée par Pacaux-Lemoine et *al*. (2011) au cours de laquelle l'ETC a été évalué. L'un des objectifs de cette étude a été d'établir un ETC afin de soutenir la coopération entre un opérateur humain et un robot mobile de reconnaissance.

Au cours de la mission de reconnaissance, l'opérateur se positionne à distance d'une zone cible et contrôle le robot dans cette zone. Suivant le LoA sélectionné, le robot peut se déplacer seul et transmettre des informations à l'opérateur, notamment des informations qu'aucune fonction automatisée ne peut traiter. Un ETC a été mis en place dont le but est d'informer l'opérateur humain des objectifs du robot (positions géographiques), de son analyse d'informations et de l'algorithme de déplacement utilisé en mode autonome (cf. Figure 2-4). Cela donne des informations sur le prochain point de passage du plan.

Dans cette étude, l'ETC est une interface sur laquelle un certain nombre d'informations sont affichées : les informations des capteurs, vidéo vue radar présentant les cibles et les obstacles. La partie à droite affiche le but et la tâche en cours ainsi que le mode d'autonomie actuel du robot. La partie gauche précise l'auto-évaluation du robot quant à ses capacités de mobilité. La partie basse donne un historique sur les tâches individuelles ou coopératives et la

vitesse du robot. Les résultats de cette étude ont montré que l'ETC a considérablement facilité la coopération entre les opérateurs humains et le robot.



Figure 2-4 ETC utilisé pour la coopération en robotique de reconnaissance (Pacaux-Lemoine et *al.*, 2011)

2.3.3 Modèle de la coopération homme-machine

Une représentation du concept de la coopération homme-machine est proposée par Pacaux-Lemoine (2014). Elle est basée sur le modèle de l'humain et la machine, c'est-à-dire, les SF et SC de chaque agent qui sont connectés à l'ETC.

Cette organisation (cf. Figure 2-5) peut soutenir plusieurs formes de coopération à savoir, les différents LoA analysés précédemment, ainsi que les formes, modes et structures de coopération présentés dans la section 2.4.

L'agent artificiel représente un robot de service mobile qui doit coopérer avec un agent humain afin d'atteindre un objectif commun. Le robot peut ou non avoir le même SF que l'humain. Par exemple, le robot peut obtenir des informations sur l'environnement à l'aide de ses capteurs. Il peut aussi analyser les informations collectées et prendre une décision grâce aux algorithmes implémentés, puis exécuter l'action.

Grâce à sa formation et à son expertise, l'agent humain a l'avantage d'anticiper certaines situations notamment suite à des évènements inattendus. Sa limite porte surtout sur le niveau de fatigue et de frustration en raison d'une charge de travail élevée qui peut le conduire à être moins fiable et efficace. Inversement, l'avantage du robot tient à sa capacité d'intervenir dans des environnements dangereux pour l'humain. Quant à ses limites, elles reposent par exemple sur le niveau de charge de la batterie qui peut être insuffisant pour accomplir toute la mission, ou une panne d'un élément technique (capteur, actionneur) qui l'empêche d'appliquer son SF.

Par conséquent, ils peuvent s'aider mutuellement pour mettre à profit leurs avantages respectifs et compenser les limites de l'autre. Les agents humains peuvent rester dans la boucle de contrôle afin de superviser le robot ou le groupe de robots.

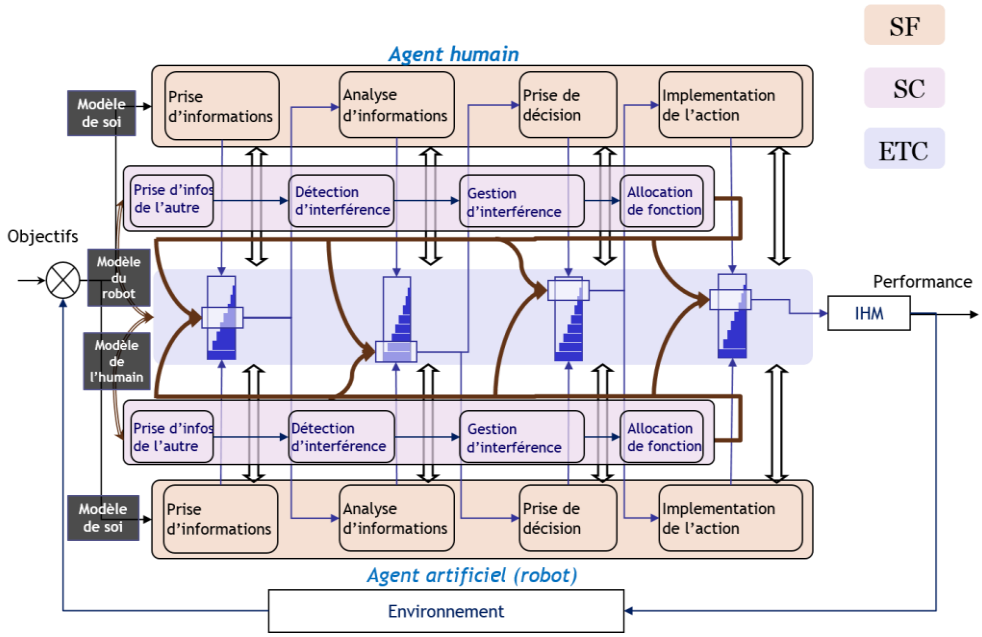


Figure 2-5 Modèle de la coopération homme-machine (Pacaux-Lemoine, 2014)

L'objectif est donc de tirer parti de cette complémentarité pour contrôler toute situation, normale ou anormale. Le SC participe à l'ajustement et à la mise en œuvre d'un tel équilibre. Le robot et l'agent humain communiquent et échangent des informations en temps réel (mode synchrone) ou non (mode asynchrone) (Sakamoto & Kuwana, 1993) par le biais d'un ETC. L'ETC soutient la coopération entre les agents en permettant tout type de communication (*e.g.* visuelle, audio ou haptique). Dans certaines situations complexes, les activités de coopération entre humain et robot peuvent être compliquées à gérer. Par conséquent, le SC de l'humain doit être bien développé pour comprendre et coopérer avec le robot. Mais cela peut entraîner une détérioration de l'état de l'humain, surcharge et frustration par exemple. Afin d'éviter de telles situations, le SC du robot doit également être développé. L'agent humain essaie de construire un modèle de fonctionnement du robot pour mieux l'utiliser et le robot tente de construire un modèle de l'humain, au moins quelques critères de coopération, afin d'être le plus coopératif possible.

En utilisant l'ETC, l'agent humain peut accéder à certaines informations et paramètres qu'il peut adapter en fonction de ses préférences et besoins. Grâce au modèle du robot, l'humain est en mesure d'évaluer le comportement de celui-ci.

En se basant sur le modèle de coopération (cf. Figure 2-5), le robot peut obtenir des informations sur l'agent humain grâce à ses capteurs et ses analyses. Il peut détecter les interférences entre par exemple, son analyse de la situation et celle de l'humain ; il peut aussi détecter le stress ou la frustration de ce dernier. Il peut gérer les interférences en prenant une décision concernant l'agent humain. Par exemple, il alerte celui-ci par bip sonore, puis il décide de s'allouer la fonction. En même temps, l'humain en utilisant son SC peut évaluer le fonctionnement du robot par ses actions.

L'*autorité* et l'*allocation de fonctions* peuvent être gérées au niveau de chaque fonction du SF (curseur sur les échelles de la Figure 2-5), il est possible d'allouer la fonction à l'humain ou au robot, ou aux deux à différents degrés, comme dans le contrôle partagé. L'allocation de fonctions peut être prédéfinie ou peut être mise à jour en fonction de la décision de l'humain ou du robot en tenant compte de leur SF. De ce fait, la coopération homme-machine permet de compenser les capacités limitées et de répondre aux difficultés rencontrées par un ou plusieurs agents. Selon le besoin, trois formes de coopération sont définies par Schmidt.

2.4 Organisation de la coopération

2.4.1 Organisation fonctionnelle : formes de Schmidt

La coopération est finalisée, c'est-à-dire dirigée par l'atteinte d'un objectif qui est le plus souvent le but de la tâche commune. De nombreuses fonctions de la coopération ont été définies par Schmidt dans un contexte de coopération humain-humain en sciences humaines (Schmidt, et *al*., 1991), selon que le besoin, pour réaliser la tâche est : d'accroitre les SF similaires « forme augmentative de la coopération », d'intégrer différents SF « forme intégrative de la coopération » ou de confronter les différents résultats « forme confrontative de la coopération ». Elles ont été spécifiées dans le contexte de la coopération homme-machine (Millot & Hoc, 1997) (Millot & Lemoine, 1998).

2.4.1.1 Forme augmentative

Dans la forme augmentative, les agents possèdent des SF similaires et la tâche à accomplir est divisée en sous-tâches identiques. Cette forme de coopération cherche à réunir les capacités similaires des différents agents afin de parvenir à une meilleure performance. Par exemple, l'assistance que peut fournir un robot mobile à l'opérateur humain pour éviter un obstacle tout en l'alertant de sa proximité.

2.4.1.2 Forme intégrative

Dans la forme intégrative, les agents ont des SF différents mais complémentaires et la tâche à accomplir est divisée en sous-tâches distinctes. Chaque sous-tâche est réalisée par l'agent ayant le savoir-faire requis. Par exemple, la différence de perception de l'opérateur humain et d'un robot mobile dans une salle enfumée. Le robot, grâce à ses capteurs peut percevoir un obstacle proche que l'opérateur humain ne peut pas voir et partager cette information sur un ETC. Cette information peut être ensuite récupérée et utilisée par l'opérateur humain depuis l'ETC.

2.4.1.3 Forme confrontative

Dans la forme confrontative, les agents ont des SF similaires et la tâche à accomplir n'est pas décomposée en sous-tâches. Les résultats des différents agents sont comparés et modifiés afin de parvenir à un meilleur résultat, ce peut être la confrontation établie entre l'opérateur humain et le robot sur l'action à mettre en œuvre lors de la détection d'un obstacle.

Lors de la conception de la coopération entre l'humain et la machine, il est important de définir son organisation structurelle.

2.4.2 Organisation structurelle

L'organisation structurelle de la coopération permet d'expliciter les responsabilités des agents dans le but de résoudre les conflits décisionnels (Millot & Mandiau, 1995). Dans la littérature, on retrouve deux types de structures de coopération homme-machine : verticale et horizontale (Millot, 1988).

2.4.2.1 Structure verticale

La structure de coopération homme-machine, verticale dite hiérarchique, met l'opérateur humain sur un niveau hiérarchique supérieur tout en lui donnant la possibilité d'interagir et d'échanger les informations avec un système d'aide à la décision (cf. Figure 2-6).

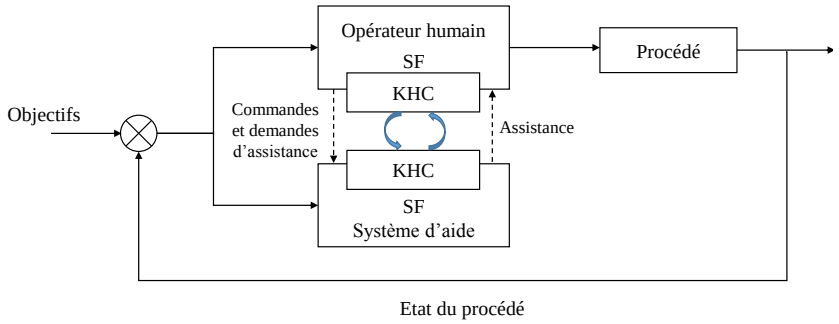


Figure 2-6 Structure verticale de la coopération homme-machine

Les deux agents sont tous deux capables d'établir des stratégies de prise de décision, mais seul l'opérateur humain a l'autorité et peut décider de la stratégie à adopter et de son exécution.

2.4.2.2 Structure horizontale

La structure de coopération homme-machine horizontale met l'opérateur humain et la machine sur le même niveau hiérarchique, cette structure consiste à répartir dynamiquement les tâches entre les deux (cf. Figure 2-7). Ce partage de tâches doit d'une part permettre d'optimiser les performances globales de tout le système homme-machine, et d'autre part de maintenir l'opérateur humain dans la boucle de supervision à une charge de travail raisonnable. En effet, la sous-charge de travail permanente peut provoquer une perte de vigilance de l'opérateur humain. La surcharge de travail, quant à elle, peut donner lieu à des erreurs.

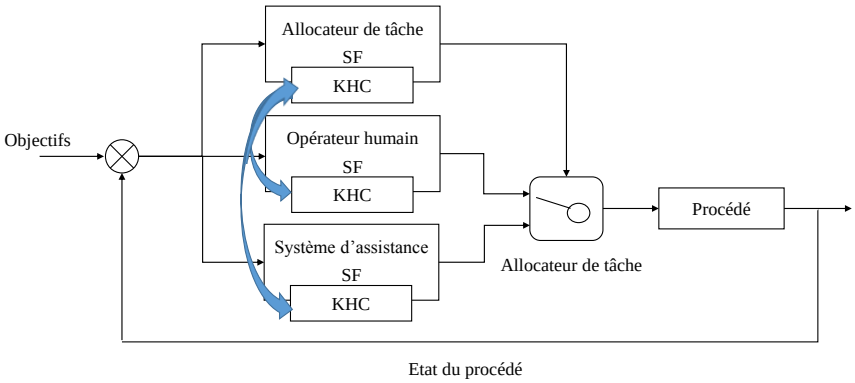


Figure 2-7 Structure horizontale de la coopération homme-machine

2.4.3 Organisation coopérative multi-niveau

En référence au chapitre 1, les activités des agents réalisant une tâche commune peuvent être décomposées selon trois niveaux d'abstraction : un niveau *stratégique* correspondant à la définition du plan global de la tâche, un niveau *tactique* dans lequel le plan, décomposé en sous-tâches peut être actualisé, et un niveau *opérationnel* dans lequel les actions sont mises en œuvre. L'activité coopérative peut suivre la même décomposition, les activités des agents impliqués dans le contrôle du même procédé peuvent être sur un ou plusieurs niveaux selon leurs SF et SC. De par son autorité l'agent humain est plus souvent impliqué aux niveaux stratégique et tactique, alors qu'un agent artificiel est plutôt placé au niveau opérationnel (Millot, 2014b). La coopération peut alors être assurée au sein même d'un niveau, ou entre plusieurs niveaux (Hoc & Lemoine, 1998) (cf. Figure 2-8).

À titre d'exemple, dans une série d'expériences appelée SPECTRA V2 (Système de

Partage Expérimental de Tâches de Contrôle de Trafic Aérien Version 2) réalisée dans le cadre de la gestion du trafic aérien (Lemoine et *al.*, 1996) l'organisation comprenait deux niveaux avec une coopération homme-machine à chaque niveau et entre les niveaux : - entre un contrôleur radar (CR) et un système automatique de détection et de résolution de conflits aériens (SAINTEX) au niveau tactique, - entre un contrôleur organique (CO) et un module d'aide à la planification (PLAF) au niveau stratégique ainsi qu'une coopération inter-niveau entre le CO et CR. Le CR réalise des tâches de type tactique. Son rôle consiste à anticiper et à résoudre d'éventuels risques de collision entre deux avions, en communiquant aux pilotes certaines informations et en donnant l'ordre à l'un des deux de modifier la trajectoire de son appareil. Le CO réalise des tâches de type stratégique. Il assure la coordination entre les secteurs afin d'éviter d'éventuels conflits. Il anticipe aussi la densité du trafic et règle la charge de travail du CR.

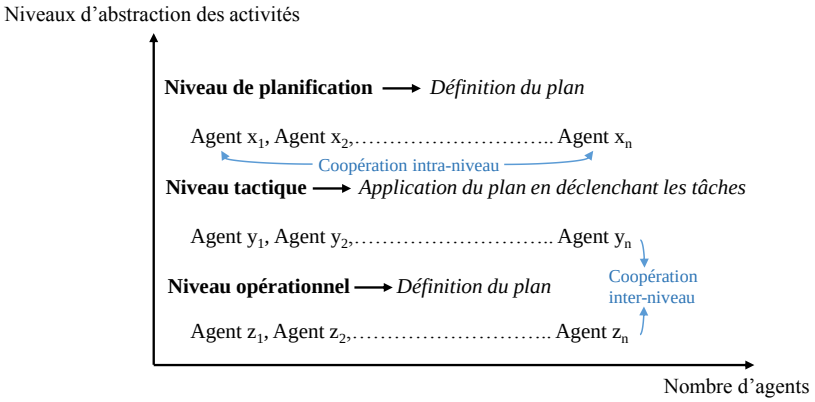


Figure 2-8 Organisation coopérative multi-niveau

2.5 Conclusion

Ce chapitre a positionné l'importance de l'adaptation des LoA dans un système homme-machine. Une synthèse réalisée sur les deux principales approches de l'adaptation des LoA a montré que chacune des approches a ses avantages et inconvénients, mais que l'approche qui semble la plus performante est l'approche « hybride » c'est-à-dire à la fois adaptable et adaptative. Les critères décisionnels permettant de décider qui, quoi et quand changer de LoA, définissant l'organisation, la coopération et le partage de fonctions constituent les éléments principaux pour garantir l'efficacité et l'acceptabilité d'un système homme-machine. Les LoA adaptables doivent donc prendre en compte les interactions entre l'humain et la machine. Les principes et concepts de la coopération homme-machine peuvent apporter des éléments nécessaires à la définition des LoA adaptables. C'est dans cette perspective que ce chapitre a présenté le cadre théorique de la coopération homme-machine, notamment l'importance de

l'ETC pour soutenir la coopération. Le chapitre suivant nous montre comment utiliser ces concepts dans l'approche de conception de LoA adaptables.

3 PROPOSITION D'UNE METHODOLOGIE DE CONCEPTION DE NIVEAUX D'AUTOMATISATION

3.1 Introduction

Le choix de LoA appropriés reste une étape difficile dans la conception de systèmes complexes homme-machine. Les chapitres précédents ont montré les limites de l'automatisation dans la robotique et la nécessité de la prise en compte des facteurs humains lors de cette phase de conception. En effet, un système hautement automatisé conduirait entre autres à une faible conscience de la situation et à une perte de vigilance de la part de l'opérateur humain. En revanche, une faible automatisation pourrait être insuffisante pour répondre aux besoins de l'opérateur humain et pourrait entrainer une dégradation des performances du système homme-machine. C'est pourquoi ce chapitre propose une approche méthodologique basée sur un modèle de coopération homme-machine qui permet d'identifier les différentes interactions possibles entre l'humain et le robot, puis de définir des LoA adéquats en tenant compte des capacités de l'humain et du robot en fonction de la situation. La méthode proposée peut être considérée comme un guide pour les concepteurs humains, qui les aiderait à identifier sur un poste d'opérateur existant ou à créer, quelle serait la meilleure organisation avec le robot, puis de choisir et implémenter les LoA appropriés.

3.2 De la coopération homme-machine aux niveaux d'automatisation

Le modèle et les principes de la coopération homme-machine présentés dans le chapitre précédant visent à développer une approche permettant de déterminer les différentes interactions possibles lors d'une coopération entre deux agents. Le principe de cette méthode est d'identifier et de concevoir les combinaisons possibles du SF et du SC de chaque agent coopératif impliqué dans une mission donnée.

À cet effet nous avons choisi un système binaire, comme première approche pour identifier les SF et SC des agents et leur combinaison, au cours de chaque étape du processus décisionnel. On attribue un « 1 » à l'agent ayant la capacité d'exécuter la fonction et un « 0 » dans le cas contraire. Comme toutes les fonctions doivent être allouées à au moins un agent, trois cas sont possibles: [1 0] seul l'humain a le SF, [0 1] seul le robot a le SF et [1 1] l'humain et le robot ont le SF. Il en est de même pour le SC. Nous estimons que malgré la simplification excessive des modèles de l'humain issus de la psychologie menée dans le but de mettre en correspondance les compétences de l'humain avec ceux de la machine, il serait néanmoins compliqué d'utiliser des valeurs numériques autres que binaires. C'est le choix que nous avons fait dans cette étude exploratoire sachant que des approches telles que la logique floue pourraient être envisagées à l'avenir, pour un partage de fonctions plus souple.

3.2.1 Interactions lors d'une coopération homme-robot

Le modèle de l'agent coopératif défini à la Figure 2-5 du chapitre 2 est utilisé afin de définir toutes les allocations possibles des fonctions constituant les SF et SC de l'humain et du robot (cf. Figure 3-1).

Les Figure 3-2 et Figure 3-3 illustrent les allocations possibles des fonctions constituant respectivement les SF et SC de l'humain et du robot. Pour chaque fonction du SF sont intégrées les fonctions du SC. En effet, nous admettons que les agents peuvent coopérer et échanger leurs résultats à chaque fonction du SF. L'identification des chemins sur les graphes des Figure 3-2 et Figure 3-3, permet d'identifier les LoA.

Lors de la première fonction SF (prise d'informations), l'agent qui a le SF obtient des informations de l'environnement. Ensuite, si cet agent a la capacité de communiquer (SC : envoi d'informations) et si le contexte le permet et le demande, il fournit et partage ces informations via l'ETC. Le résultat de cette fonction est envoyé à la fonction suivante du SC (détection d'interférence). Dans cette fonction, l'agent qui possède la capacité, détecte ou pas une éventuelle interférence entre son résultat et le résultat de l'autre agent. Le résultat de cette

fonction est ensuite transféré à la fonction de gestion d'interférence, qui est effectuée par l'un ou les deux agents selon leur capacité. Lorsque les deux agents gèrent l'interférence trois formes de gestion de l'interférence sont possibles : *négociation*, *acceptation* et *imposition*. La négociation vise à gérer le conflit entre les deux agents en essayant de donner des explications et, si le coût cognitif de la négociation est trop élevé, l'acceptation est choisie. L'acceptation est adoptée afin qu'un agent facilite l'activité de l'autre.

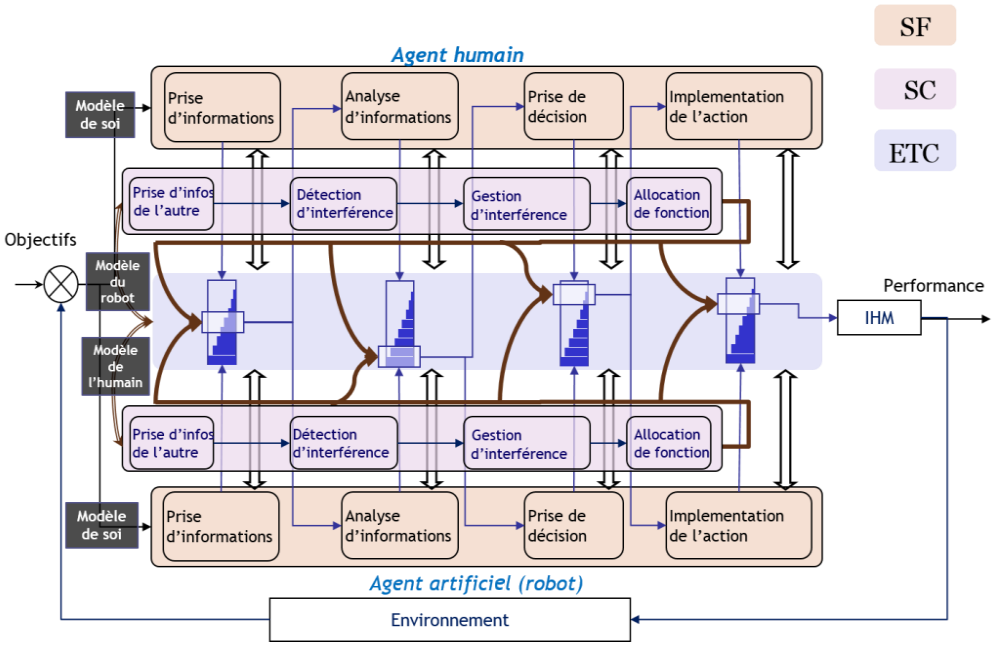


Figure 3-1 Modèle de coopération utilisé pour définir les différentes allocations possibles de fonctions entre l'humain et le robot (par la suite chaque fonction du SF et du SC sera réduite en 0 et 1)

L'imposition est le contraire de l'acceptation (Pacaux-Lemoine & Debernard, 2000). Chacune de ces formes de gestion d'interférence peut être identifiée dans certains LoA des taxonomies présentées dans le chapitre 2. À titre d'exemple, la négociation est utilisée dans le niveau 4 de la taxonomie proposée par Draper (1995), l'acceptation est exprimée dans le niveau 2 de la taxonomie de Ruff et *al*. (2002), et l'imposition est formulée dans les niveaux 3 des taxonomies de Ruff et *al*. (2002) et de Zieba et *al*. (2010). Enfin, l'agent ayant la *responsabilité* et l'*autorité* décide de l'allocation de la fonction compte tenu du résultat de gestion d'interférence. Ensuite, le résultat de la prise d'informations est envoyé à la fonction de l'analyse, au niveau de laquelle le même processus s'exécute : utilisation de l'ETC pour obtenir et communiquer des informations sur l'analyse, détection d'interférence, gestion d'interférence et l'allocation de fonction.

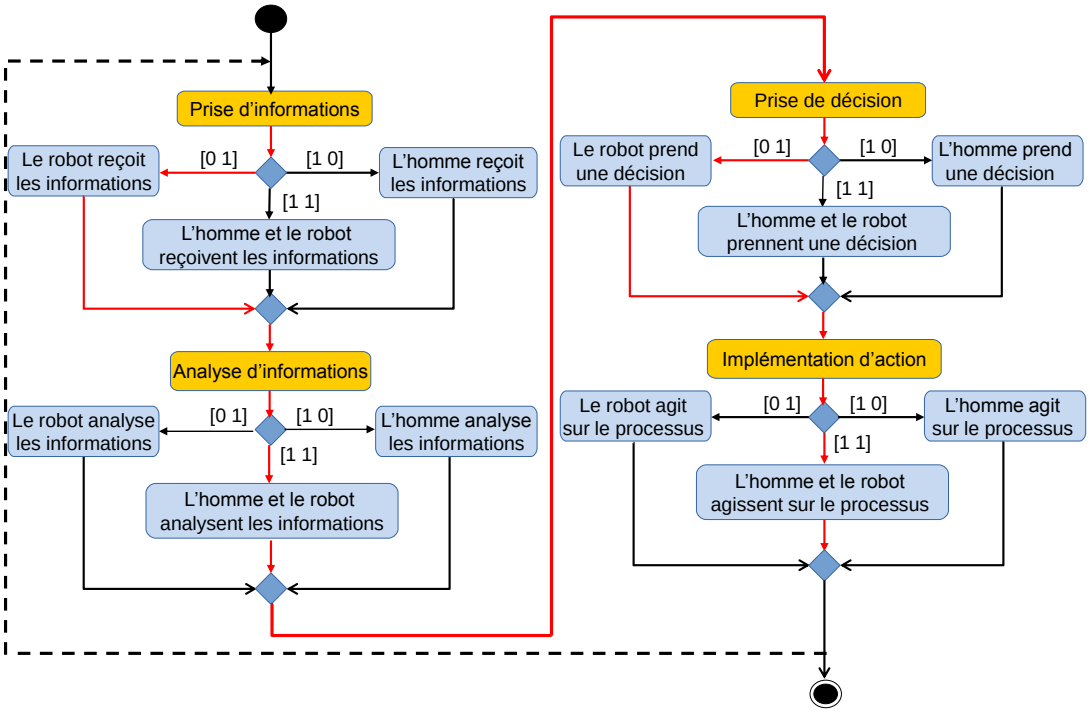


Figure 3-2 Allocations possibles des fonctions constituant le SF de l'humain et celui du robot

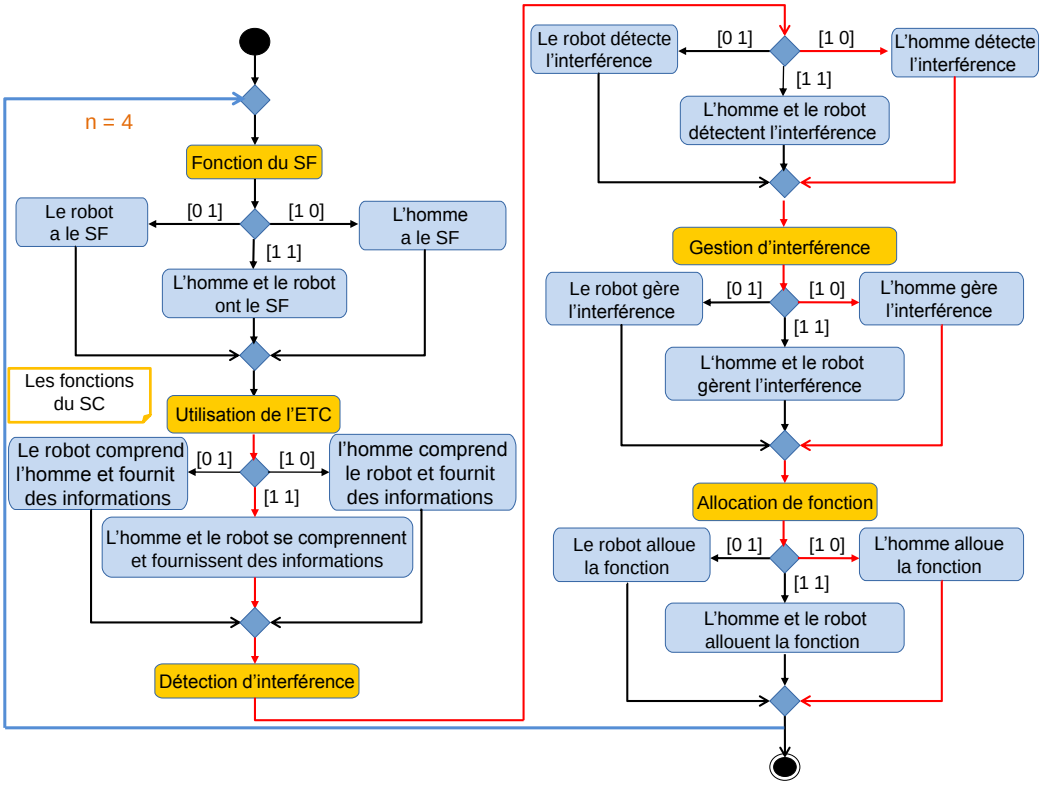


Figure 3-3 Allocations possibles des fonctions constituant le SC de l'humain et celui du robot à chaque fonction du SF

Après l'étape de l'analyse, le résultat est utilisé pour la prise de décision où chaque agent utilise son SC pour obtenir le résultat de l'analyse d'informations et l'utiliser pour prendre une

décision appropriée. Si les deux agents ont le SC, ils peuvent accepter, négocier ou imposer leur décision. Ensuite, la prise de décision est mise en œuvre par l'agent qui a la capacité d'agir sur le procédé. Il est à noter que même dans cette étape, le SC est nécessaire pour détecter et gérer l'interférence si elle existe et allouer la fonction.

Afin de bien comprendre cette approche, un exemple de scenario est présenté. Ce scénario est le fruit de plusieurs échanges menés avec les commandants de sapeurs-pompiers du Nord de la France (SDIS 59)[4] au cours de réunions, ainsi qu'à l'occasion de notre participation à des exercices mis en place pour entraîner les pompiers à lutter contre un incendie dans un cinéma, gérer des accidents sur autoroutes et maîtriser des échauffourées entre supporters dans un stade de football (Matta et *al*., 2016).

De nos jours, les sapeurs-pompiers n'utilisent pas de robot mobile autonome, mais ils identifient clairement plusieurs cas dans lesquels les robots peuvent limiter, voire supprimer l'intervention de l'humain dans des situations dangereuses, ou des situations dans lesquelles les robots seraient mieux équipés pour atteindre certains objectifs, tel que nous le montrons dans le cas d'usage suivant.

3.2.2 Cas d'usage

Soit l'exemple de coopération homme-robot suivant : « un agent humain coopère avec un robot afin de trouver une vanne de fermeture d'une canalisation de gaz dans une salle enfumée. L'humain et le robot partagent le même environnement. L'humain est à côté du robot équipé d'un écran sur lequel quelques informations sont affichées ». Dans cet exemple, nous considérons que 1) l'humain porte un vêtement « intelligent » équipé de capteurs permettant d'enregistrer sa position et son orientation, 2) le robot a la possibilité d'obtenir des informations sur l'humain au moyen du vêtement « intelligent », 3) l'humain peut voir le robot et les résultats de ses capteurs sur l'écran. Nous supposons que l'humain n'est pas capable de trouver la trajectoire la plus sécurisée, contrairement au robot, mais 4) seul l'humain peut fermer la vanne de gaz. La salle enfumée est un exemple qui souligne l'importance du LoA, lorsque l'humain a du mal à percevoir l'environnement à cause de la fumée ou de l'obscurité, où le robot utilise ses capteurs et aide l'humain à avoir des informations sur l'environnement (le robot compense le manque du SF de l'humain). L'utilisation d'un vêtement « intelligent » permet d'obtenir des informations sur l'état physiologique de l'humain en mesurant par exemple la variabilité de la

[4] Service Départementale d'Incendie et de Secours du Nord de la France

fréquence cardiaque. Nous avons uniquement étudié cette possibilité par le biais de tests de faisabilité (Pacaux-Lemoine et *al*., 2017).

Le SF et le SC des deux agents concernant la fonction du SF « prise d'informations » dans le cadre de ce scénario sont présentés par les flèches rouges sur les Figure 3-2 et Figure 3-3.

1) Pour la fonction du SF *Prise d'informations* [0 1] : le robot reçoit des informations de l'environnement et du procédé. Cette fonction ne peut être allouée qu'au robot car la fumée limite les capacités de l'humain à percevoir l'environnement.

– Utilisation de l'ETC pour obtenir et communiquer les informations [1 1] : le robot reçoit des informations sur l'humain au moyen du vêtement « intelligent » partagées dans l'ETC. L'humain a également la possibilité de voir le robot et d'obtenir des informations (sur l'environnement et l'état du robot) sur l'écran du robot. – Détection d'interférence [1 0] : seul l'humain a la capacité de détecter les interférences concernant, par exemple, de fausses informations causées par une défaillance au niveau d'un des capteurs du robot. – Gestion de l'interférence [1 0] : l'humain essaye de régler l'interférence en changeant par exemple, le capteur défaillant. – Allocation de la fonction [1 0] : l'humain décide de laisser le robot poursuivre la prise d'informations.

2) Pour la fonction du SF *Analyse d'informations* [1 1] : l'humain et le robot ont le SF permettant d'analyser la situation selon les données des capteurs. Le SF de l'humain peut être plus pertinent que celui du robot, de par son expérience ou son expertise devant certaines situations. Le robot doit interpréter les données issues de ses différents capteurs.

– Utilisation de l'ETC pour obtenir et communiquer les informations [1 1] : chaque agent a la possibilité de recueillir des informations à partir de l'analyse de chacun en utilisant l'ETC. – Détection d'interférence [0 1] : seul le robot a la capacité d'évaluer l'analyse faite par l'humain, il détecte si l'analyse de l'humain est correcte ou non. Par exemple l'humain pense qu'une trajectoire est correcte de par le plan de la salle (affiché sur l'écran du robot), mais le robot détecte plusieurs obstacles. – Gestion de l'interférence [0 1] : le robot peut alors utiliser son SC dans cette étape et tente de gérer l'interférence (l'analyse de l'humain est fausse) en alertant par exemple l'humain via un message (audio, visuel ou haptique). – Allocation de la fonction [1 0] : dans cette étape, l'agent humain peut accepter, refuser ou modifier le résultat du robot.

3) Pour la fonction du SF *Prise de décision* [0 1] : en utilisant le résultat de la fonction

précédente (analyse d'informations), le robot décide de la trajectoire optimale pour atteindre la vanne grâce à ses algorithmes.

– Utilisation de l'ETC pour obtenir et communiquer les informations [1 0] : l'humain a la possibilité de recueillir des informations sur la décision et les intentions du robot en utilisant par exemple la carte affichée sur l'écran du robot. – Détection d'interférence [1 0] : l'humain détecte que la trajectoire sélectionnée par le robot n'est pas sûre pour lui. – Gestion de l'interférence [1 0] : l'humain fournit au robot des données supplémentaires dont le robot ne dispose pas ou essaie de corriger la trajectoire choisie par le robot à l'aide de son SC, dans ce cas le SC de l'humain compense son manque de SF, c'est-à-dire que l'humain n'a pas le SF pour décider de la trajectoire optimale à prendre, mais grâce à son SC, il peut utiliser les informations données par le robot afin de trouver la meilleure trajectoire et la plus sûre. – Allocation de la fonction [0 1]: le robot gère la fonction selon son nouveau SF.

4) Pour la fonction du SF *Implémentation d'action* [1 1] : l'humain suit le robot selon la trajectoire sélectionnée.

– Utilisation de l'ETC pour obtenir et communiquer les informations [0 1] : le robot peut obtenir des informations sur les actions de l'humain (position et orientation) à l'aide des données des capteurs. – Détection d'interférence [0 1] : le robot peut, par exemple, détecter que l'orientation de l'humain est fausse. – Gestion de l'interférence [0 1] : le robot avertit l'humain par un message audio, visuel ou haptique. – Allocation de la fonction [1 0] : l'humain peut accepter, refuser ou modifier la fonction en tenant compte de la situation.

Cette approche a permis d'identifier un LoA à partir de la combinaison des SF et SC de l'humain et du robot. Le Tableau 3-1 synthétise ce résultat. Les lignes bleues correspondent à l'allocation des 4 fonctions du SF, les lignes oranges à l'allocation des 4 fonctions du SC à chaque fonction du SF (utilisation de l'ETC pour l'échange d'informations (ETC), détection d'interférence (DI), gestion d'interférence (GI) et allocation de fonction (AF)). Cette combinaison de fonctions que chaque agent peut réaliser, donne lieu à un LoA.

Rappelons que compte tenu de l'aptitude d'un agent à exécuter une fonction, trois cas sont possibles : [1 0] humain, [0 1] robot et [1 1] humain et robot. L'ensemble des allocations possibles des fonctions du SF et du SC est N^F, où « N » représente le nombre de cas possibles pour chaque fonction et « F » le nombre de fonctions du SF et du SC à allouer. Nous rappelons que pour chaque fonction du SF, les quatre fonctions du SC sont considérées. Donc, F = 20 et N = 3 ([1 0], [0 1] et [1 1]). Dans le but de réduire le nombre très important de combinaisons,

des règles de sélection de paires agent-fonction réalisables sont appliquées. Il est à noter que les règles ne sont pas génériques mais dépendantes du domaine d'application.

Tableau 3-1 Les combinaisons des fonctions du SF et SC de l'humain et du robot identifiées pour le cas d'usage

SF (Humain)	Prise d'informations				Analyse d'informations				Prise de décision				Implémentation d'action			
	0				1				0				1			
SC (Humain)	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1
	ETC	DI	GI	AF	ETC	DI	GI	AF	ETC	DI	GI	AF	ETC	DI	GI	AF
SF (Robot)	Prise d'informations				Analyse d'informations				Prise de décision				Implémentation d'action			
	1				1				1				1			
SC (Robot)	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0
	ETC	DI	GI	AF	ETC	DI	GI	AF	ETC	DI	GI	AF	ETC	DI	GI	AF

Ainsi nous avons défini des règles afin de générer des LoA appropriés pour un système homme-robot dans le cadre de la robotique mobile de service. L'humain et le robot sont tous les deux représentés sur la base du modèle de coopération (cf. Figure 3-1).

1ère règle : la tâche principale (mission), que l'humain et le robot doivent réaliser est décomposée en sous-tâches suivant les trois niveaux d'abstraction des activités (stratégique, tactique et opérationnel cf. chapitre 2).

2ème règle : l'allocation des fonctions du SC porte plus particulièrement sur la fonction de l'implémentation d'action. C'est une simplification de la méthode pour les cas d'usages de cette thèse, où les principales interférences entre l'humain et le robot ont lieu au niveau de l'action.

3ème règle : l'agent qui détecte une interférence doit la gérer en alertant l'autre agent, par exemple par message.

4ème règle : le SC de l'humain est fixé en fonction de son niveau d'entraînement à utiliser le robot (cf. section 3.3.3). Pour une coopération réussie, l'humain et le robot doivent rester en communication tout au long de la mission.

5ème règle : selon certains facteurs, tels que les facteurs restrictifs (par exemple le fait qu'un agent ne dispose pas de capteurs nécessaires pour l'exécution d'une tâche/fonction ou sa localisation qui l'empêcherait de réaliser certains tâches/fonctions), une ou plusieurs fonctions peuvent n'être allouées qu'à un seul agent (humain ou robot).

Ces règles n'ont pas été choisies au hasard, mais sont le résultat de réflexions et d'hypothèses issues de la bibliographie que nous souhaitons appliquer et tester

expérimentalement.

3.3 Coopération en robotique mobile de service

Dans le cadre de la robotique mobile (terrestre) de service, la tâche globale peut être composée principalement des sous-tâches suivantes. Celles-ci sont classées en fonction des trois niveaux d'abstraction : stratégique, tactique et opérationnel (cf. Figure 3-4).

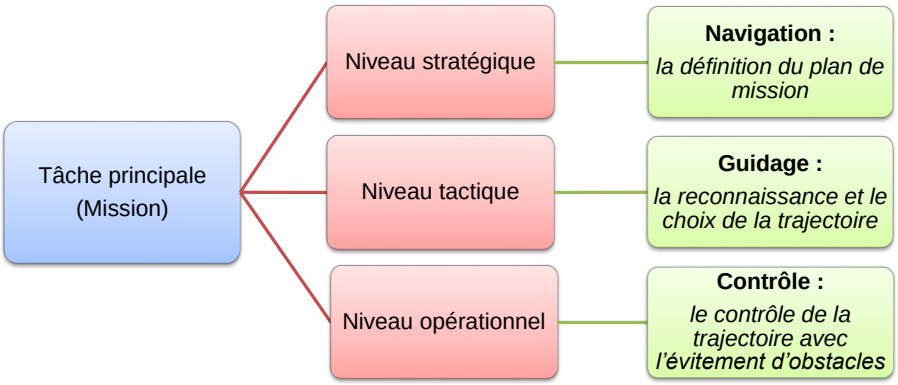


Figure 3-4 Décomposition de la tâche principale (mission) en sous-tâches dans le cadre de la robotique mobile de service

Au niveau opérationnel, les sous-tâches concernent le contrôle du déplacement du robot en intégrant la détection et l'évitement d'obstacles. *Au niveau tactique*, les sous-tâches représentent la reconnaissance (identification des buts que la mission doit atteindre) et le choix de la trajectoire à suivre entre deux buts (mise à jour du plan). *Au niveau stratégique*, la sous-tâche concerne principalement la définition du plan global de la mission en fonction des buts à atteindre.

3.3.1 Savoir-faire de l'humain et du robot

Le SF de l'humain et celui du robot sont identifiés suivant la méthode présentée dans la section précédente. Le Tableau 3-2 donne un exemple qui décrit, pour chaque niveau d'activité les besoins des agents en termes de prise d'informations, d'analyse, de prise de décision et de mise en œuvre de l'action. Cette décomposition permet une meilleure compréhension et définition des capacités de chaque agent. Les caractéristiques techniques du robot sont identifiées à chaque fonction et à chaque niveau d'abstraction des activités.

Selon l'expertise et l'expérience de l'opérateur humain, celui-ci peut disposer ou non du SF requis pour mener à bien les fonctions qui lui sont allouées dans le système homme-robot.

De plus, sa performance peut varier au cours de la mission. En effet, en raison de certains facteurs environnementaux, par exemple de fortes chaleurs ou gaz nocifs dus au feu, l'opérateur humain peut exécuter les fonctions avec une baisse de performance, ou avec le risque de commettre des erreurs.

Dans ce cas, certaines fonctions peuvent être allouées au robot. Néanmoins, lorsque le robot ne dispose pas du SF nécessaire pour réaliser une tâche (par exemple se déplacer), à cause d'un obstacle difficile à éviter, l'opérateur humain doit reprendre le contrôle temporairement, ou jusqu'à la fin de la tâche. Ce SF se situe au niveau opérationnel et concerne le contrôle du déplacement du robot avec l'évitement d'obstacles. En outre, le robot peut interagir et coopérer avec l'humain afin de mettre à jour sa trajectoire par exemple pour atteindre un nouvel objectif reçu du niveau stratégique. Ce SF se trouve au niveau tactique et représente le choix de la trajectoire pour atteindre un but. Dans le cadre de la robotique mobile terrestre de service, un but désigne par exemple une position géographique ou une direction à atteindre.

3.3.2 Savoir-coopérer de l'humain et du robot

Les SC de l'humain et du robot permettent à chacun de construire un modèle de l'autre agent. Ce modèle est utilisé afin de savoir quelle est la compréhension actuelle de l'autre du procédé et quelles sont ses intentions. Ceci dépend du LoA et de la forme de coopération.

Le LoA permet de déterminer lequel des deux agents possède le meilleur SF pour réaliser une tâche (ou une fonction). La forme de coopération permet de savoir si les deux agents ont un SF similaire ou bien quel SF des deux agents est préférable afin d'atteindre l'objectif global du système homme-robot.

Le SC permet aussi de fournir à l'autre agent différentes informations si elles lui sont nécessaires pour la réalisation de son activité. Dans le cas de la robotique mobile de service, la prise d'informations sur l'environnement au niveau opérationnel est souvent réalisée par le robot. L'opérateur humain utilise généralement ces informations pour superviser le robot et lui venir en aide lorsqu'un problème apparaît ou en prendre le contrôle lorsqu'il (l'humain) identifie de nouvelles informations ou de nouveaux objectifs depuis l'ETC (SF tactique pour la prise d'informations) ou fournis par le niveau stratégique

Dans ce cas, les échanges d'informations entre l'humain et le robot sont souvent effectués à partir d'écrans. Ces derniers, affichent le plan de mission, l'évolution du procédé et expriment les SF et les SC des agents.

Tableau 3-2 Exemple de définition des fonction du SF et SC de l'humain et du robot (*en italique*) suivant les niveaux d'abstraction (Pacaux-Lemoine et *al.*, 2011)

Agent	**Homme**	***Robot***	**Homme**	***Robot***	**Homme**	***Robot***	**Homme**	***Robot***
Savoir-faire	**Prise d'informations**		**Analyse d'informations**		**Prise de décision**		**Implémentation d'action**	
Niveau stratégique	Ordres/ Plan de mission		Evaluation du plan de la mission		Modification du plan de la mission		Mise à jour du plan de la mission	
Niveau tactique	Objectifs pour le déplacement et la reconnaissance	*Objectifs pour le déplacement*	Evaluation de la trajectoire en fonction des objectifs et objets recherchés	*Evaluation de la trajectoire par rapport aux objectifs*	Arrêt, maintien ou modification de la trajectoire par rapport aux objectifs et objets recherchés	*Arrêt, maintien ou modification de la trajectoire par rapport aux objectifs*	Maintien ou mise à jour des objectifs	*Suivi des objectifs*
Niveau opérationnel		*Obstacles Positions et l'angle de rotation*	Tous les objets et la trajectoire	*Détection d'obstacles Et évaluation de la trajectoire*	Arrêt, maintien ou modification de la trajectoire	*Évitement d'obstacles et modification de la trajectoire*	Contrôle du déplacement par joystick	*Déplacement ou arrêt*
Savoir-coopérer	**Prise d'informations depuis l'ETC**		**Détection d'interférence**		**Gestion d'interférence**		**Allocation de fonction**	
Niveau stratégique	Allocation de fonction pour toute la mission	*Allocation de fonction pour toute la mission*	Analyse de l 'allocation de fonction basée sur des critères	*Analyse de l'allocation de fonction basée sur le suivi des objectifs*	Réallocation de la fonction	*Réallocation de la fonction*	Adaptation des niveaux d'automatisation	*Adaptation des niveaux d'automatisation*
Niveau tactique	Informations sur l'activité et l'état du robot	*Informations sur son activité et son état*	Désaccord sur l'objectif à atteindre	*Désaccord sur l'objectif à atteindre*	Acceptation de l'objectif suivi par le robot ou imposition d'un nouvel objectif	*Acceptation de l'objectif déterminé par l'homme ou imposition de son objectif*	Objectif imposé par l'homme	*Objectif imposé par le robot*
Niveau opérationnel	Informations sur l'activité et l'état du robot et sur l'environnement	*Communication d'information sur son activité et son état et sur l'environnement*	Désaccord sur le déplacement réalisé par le robot	*Désaccord sur le déplacement demandé par l'homme*	Acceptation du déplacement réalisé par le robot ou imposition d'un arrêt ou d'un nouveau déplacement	*Acceptation du déplacement ou l'arrêt demandé par l'homme ou imposition d'un nouveau déplacement ou d'un arrêt*	Arrêt imposé par l'homme ou modification de la trajectoire et adaptation du niveau d'automatisation	*Arrêt imposé par le robot en cas d'obstacle trop proche*

3.3.3 Modèle du comportement humain et de son savoir-coopérer

La section 3.2.2 a présenté un cas d'usage de la méthodologie proposée afin de définir toutes les interactions possibles entre l'humain et le robot en tenant compte de leurs SF et SC respectifs à chaque étape du processus cognitif de la réalisation de la tâche commune. Notons que dans certaines situations, l'exécution des quatre fonctions du SF et du SC n'est pas nécessaire.

Par exemple, lorsque le robot se déplace et évite les obstacles de manière autonome, il lui serait difficile de percevoir certains obstacles avec ses capteurs (comme une porte entrouverte ou le pied d'une chaise). Si en se rapprochant d'un obstacle, le robot ne s'arrête pas (ou ne ralentit pas), l'humain de par le modèle qu'il a du robot, peut déduire que le robot n'a pas vu l'obstacle et il l'arrête. C'est un réflexe, ce comportement est donc basé sur les habiletés (Rasmussen, 1983). Dans ce cas, seulement les fonctions de prise d'informations et l'implémentation d'action sont considérées. Tout comme pour le SF, le comportement humain vis-à-vis de son SC peut être représenté dans le modèle de Rasmussen étendu (cf. Figure 3-5).

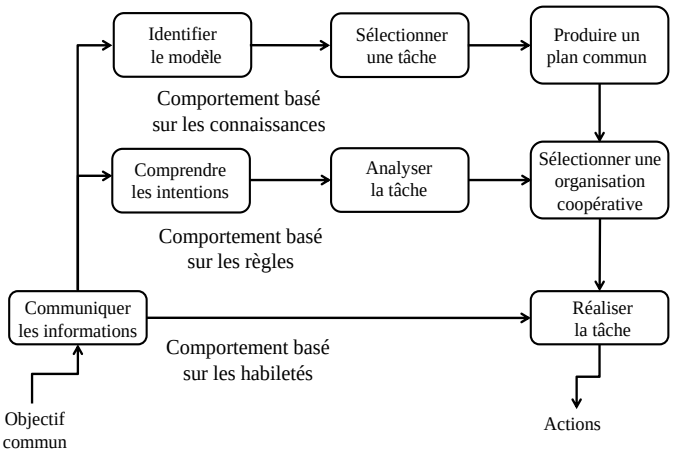


Figure 3-5 Modèle du comportement humain basé sur son SC (Habib, Pacaux-Lemoine, & Millot, 2017) adapté du modèle de (Rasmussen, 1983)

Le comportement basé sur les habiletés demande très peu d'attention et de raisonnement de la part de l'humain. Il est capable de communiquer et de coopérer directement avec le robot afin d'atteindre l'objectif commun. Un tel comportement concerne la coopération avec un robot familier dont l'humain s'est déjà construit un modèle précis. Dans le comportement basé sur des règles, l'humain a un modèle du robot, il est capable de communiquer et de comprendre les intentions du robot, mais il doit bien analyser le fonctionnement du processus afin de pouvoir sélectionner la meilleure organisation coopérative prédéfinie à l'aide de règles et d'instructions. Le dernier comportement est basé sur les connaissances, il nécessite un niveau avancé

d'attention et de raisonnement de la part de l'humain. Cela se produit lorsque l'humain est amené à travailler avec un nouveau robot. Dans ce cas, l'humain doit se créer un modèle du robot, sélectionner une tâche par rapport à l'objectif commun et produire un plan commun concernant la tâche et la coordination, puis vérifier le bon fonctionnement du processus.

3.3.4 Allocation de fonctions

Nous utilisons ici la méthodologie et les règles présentées dans la section 3.2.2, afin de définir les LoA pour un système homme-robot de la robotique mobile de service. Nous avons choisi uniquement trois LoA (LoA1, LoA2 et LoA3) car nous admettons qu'avec un nombre supérieur, il serait difficile aux opérateurs humains de comprendre et de distinguer les différences entre tous les niveaux, mais aussi de savoir dans quelles situations les utiliser.

En raison de la nature de la tâche de définition du plan de mission et des moyens techniques nécessaires pour sa réalisation sur un horizon temporel important, nous admettons que les moyens techniques et humains déjà existants sont suffisants pour notre cadre de recherche. Par conséquent, nous supposons que le plan de mission est fourni par le niveau stratégique dont les informations sont utilisées par le niveau tactique. Cependant, l'allocation des fonctions du SF et SC est définie uniquement pour les sous-tâches des niveaux tactique et opérationnel (*règle 1*).

Toutes les fonctions du SC sont mises à « 1 » pour l'humain et la « prise d'informations depuis l'ETC » est mise à « 1 » pour le robot à chaque LoA pour chaque sous-tâche. Nous supposons que les agents humains concernés sont suffisamment formés pour utiliser le robot et construire son modèle cognitif, et que les agents doivent rester en communication tout au long de la mission (*règle 4*).

Dans le cadre de ces travaux de recherche, le robot est supposé intervenir dans l'environnement opérationnel et l'humain depuis un environnement distant. Par conséquent, la fonction « prise d'informations » du SF de chaque sous-tâche ne peut être allouée qu'au robot au niveau opérationnel et ce pour chaque LoA (*règle 5*).

Le type du robot utilisé dans le cadre de ces travaux de recherche ne dispose pas de capteurs nécessaires pour réaliser du traitement d'images. De ce fait, l'opérateur humain seul réalise la reconnaissance. La fonction « prise d'informations » au niveau tactique ne peut être allouée qu'à l'humain, qui utilise le plan de mission pour définir de nouveaux buts (*règle 5*).

Le contrôle de la trajectoire avec l'évitement d'obstacles : Compte tenu du contexte

dynamique et de la complexité des tâches dans la robotique mobile de service, on estime que l'humain doit être assisté autant que possible par le robot. Dans cette perspective et par sécurité, à chaque LoA les fonctions du contrôle de l'évitement d'obstacles sont définies à « 1 » pour le robot. *Au LoA1*, toutes les fonctions du SF peuvent être allouées à l'humain, à l'exception de la fonction « prise d'informations ». *Au LoA2*, seules « l'analyse d'informations » et « la prise de décision » peuvent être allouées à l'humain. *Au LoA3*, aucune fonction du SF ne peut être allouée à l'humain.

La reconnaissance et le choix de la trajectoire : *Au LoA1*, toutes les fonctions du SF ne peuvent être allouées qu'à l'humain. *Au LoA2*, la fonction « implémentation d'action » ne peut être allouée qu'au robot. Autrement dit, les autres fonctions ne peuvent être allouées qu'à l'humain. *Au LoA3*, toutes les fonctions du SF ne peuvent être allouées qu'au robot excepté la « prise d'informations » qui ne peut être allouée qu'à l'humain.

Une synthèse des allocations de fonctions entre l'humain et le robot à chaque LoA définies pour chaque sous-tâche est donnée dans le Tableau 3-3. Les quatre fonctions du SF sont représentées en bleu (de gauche à droite : prise d'informations, analyse d'informations, prise de décision et implémentation d'action) et les quatre fonctions du SC en orange (de gauche à droite : prise d'informations depuis l'ETC, détection d'interférence, gestion d'interférence et allocation de fonction).

3.4 Description des niveaux d'automatisation

Les allocations de fonctions identifiées dans la section 3.3.4 ont permis de définir les trois LoA : manuel (LoA1), semi-autonome (LoA2) et autonome (LoA3). Dans tous ces niveaux les deux agents restent en communication via l'ETC et le robot possède le SF pour éviter les obstacles, en les contournant ou en s'arrêtant. Le niveau le plus bas est le niveau manuel, dans lequel le robot est contrôlé manuellement par l'opérateur humain (réalisation de toutes les sous-tâches par l'humain). Toutefois, le robot avertit sur l'ETC des obstacles à proximité. Si l'opérateur humain ne corrige pas son action après l'avertissement, le robot s'arrête. De plus, lorsque l'opérateur humain fait reculer le robot jusqu'à un obstacle, le robot s'arrête et empêche l'opérateur humain de reculer davantage (SC opérationnel).

Le niveau suivant (LoA2) est le niveau semi-autonome, niveau dans lequel le robot évolue dans l'environnement opérationnel en évitant les obstacles, mais sans connaitre les buts de l'opérateur humain (SF opérationnel). Cependant, ce dernier peut corriger sa trajectoire en lui envoyant une nouvelle commande (décision) quant à l'action à mettre en œuvre

Tableau 3-3 Interactions entre l'opérateur humain (OH) et le robot pour chaque LoA (LoA1, LoA2 et LoA3). « 1 » la fonction peut être allouée à l'agent sinon, « 0

LoA / Sous-tâche	LoA1 (Manuel)	LoA2 (Semi-autonome)	LoA3 (Autonome)
Niveau tactique « Le guidage » La reconnaissance (identification des objectifs) et le choix de la trajectoire	SF robot 0 0 0 0 / SC robot 1 0 0 0 / SF OH 1 1 1 1 / SC OH 1 1 1 1	SF robot 0 0 0 1 / SC robot 1 0 0 0 / SF OH 1 1 1 0 / SC OH 1 1 1 1	SF robot 0 1 1 1 / SC robot 1 0 0 0 / SF OH 1 0 0 0 / SC OH 1 1 1 1
Niveau opérationnel « Le contrôle » le contrôle de la trajectoire (déplacements du robot) avec l'évitement d'obstacles	SF robot 1 1 1 1 / SC robot 1 1 1 1 / SF OH 0 1 1 1 / SC OH 1 1 1 1	SF robot 1 1 1 1 / SC robot 1 1 1 1 / SF OH 0 1 1 0 / SC OH 1 1 1 1	SF robot 1 1 1 1 / SC robot 1 1 1 1 / SF OH 0 0 0 0 / SC OH 1 1 1 1

(avancer, reculer, tourner à gauche, tourner à droite ou s'arrêter) (SF opérationnel : implémentation de l'action). Dans ce niveau, si le robot rencontre des problèmes pour éviter un obstacles (obstacle trop proche), il s'arrête et alerte l'opérateur humain par le biais de l'ETC (SC opérationnel).

Le niveau autonome (LoA3) est le LoA dont l'automatisation est la plus élevée. L'opérateur humain utilise les informations partagées par le robot sur l'ETC et identifie au fur et à mesure les buts à atteindre (reconnaissance). Ensuite, l'opérateur humain communique au robot via l'ETC les buts à atteindre automatiquement tout en évitant les obstacles (SF tactique et opérationnel : choix de la trajectoire pour atteindre les buts et éviter les obstacles). Comme dans le niveau semi-autonome, si le robot rencontre des difficultés pour éviter un obstacle, il s'arrête et demande l'aide de l'opérateur humain (SC opérationnel). Afin de munir le robot du SF nécessaire pour atteindre des buts définis par l'opérateur humain et éviter les obstacles inconnus en toute autonomie, nous avons utilisé une commande prédictive à base de modèle. L'algorithme présenté dans la section suivante est adapté aux capacités limités des robots mobiles utilisés dans cette thèse. C'est un algorithme proposé par d'autres chercheurs que nous utilisons pour répondre à nos besoins de recherche. L'objectif n'est donc pas d'avoir un robot autonome très compétant, mais c'est d'étudier comment l'humain et le robot à ce LoA pourrait coopérer et s'entraider mutuellement pour compenser le manque de SF de chacun et faire face à des situations imprévues.

3.4.1 Intérêt de la commande prédictive à base de modèle

La commande prédictive à base de modèle (Model-based Predictive Control : MPC) est adoptée dans de nombreuses applications (électronique de puissance (Quevedo, Aguilera, & Geyer, 2019), automobile (Lima et *al*., 2018), robotique (Liu et *al*., 2018)), notamment dans les problèmes de poursuite et de suivi de trajectoires ((Wang et al., 2018), (Nascimento, Dórea, & Gonçalves, 2018), (Attia, Orjuela, & Basset, 2014)). Celle-ci traduit le processus cognitif prédictif d'un humain dans un certain nombre d'activités, tel le comportement prédictif d'une personne en déplacement dans un environnement dynamique. Intuitivement, celle-ci analyse l'état de la route future sur un horizon donné et ajuste son comportement en se basant sur des prédictions de son comportement futur (actions à réaliser) sur cet horizon.

Dans ce contexte, l'approche MPC exploite le modèle du système à commander afin de prédire son comportement futur sur un horizon fini et minimiser l'écart avec le comportement souhaité (référence).

Le principe du MPC repose sur les points fondamentaux suivants :

- Á chaque instant discret k, les sorties futures sont prédites sur un horizon défini (appelé horizon de prédiction) à l'aide d'un modèle du système à commander. Il est à noter que les prédictions réalisées sont dépendantes des entrées et des mesures connues à chaque période d'échantillonnage, ainsi que des commandes futures à calculer.
- Une séquence de commandes optimale est définie de façon à minimiser les écarts futurs entre la sortie prédite du système et la consigne (ou trajectoire de référence).
- Seul le premier élément de la séquence optimale est appliqué au système, le reste des éléments est négligé car à l'instant suivant $(k+1)$, de nouvelles mesures du système sont disponibles et toutes les étapes précédentes sont répétées. Ce processus suit le principe de l'horizon fuyant (ou glissant).

Le principe fondamental du MPC peut être représenté par le diagramme temporel de la Figure 3-6. Un modèle discret du robot basé sur l'approche MPC est utilisé pour prédire son comportement et décider des commandes à appliquer.

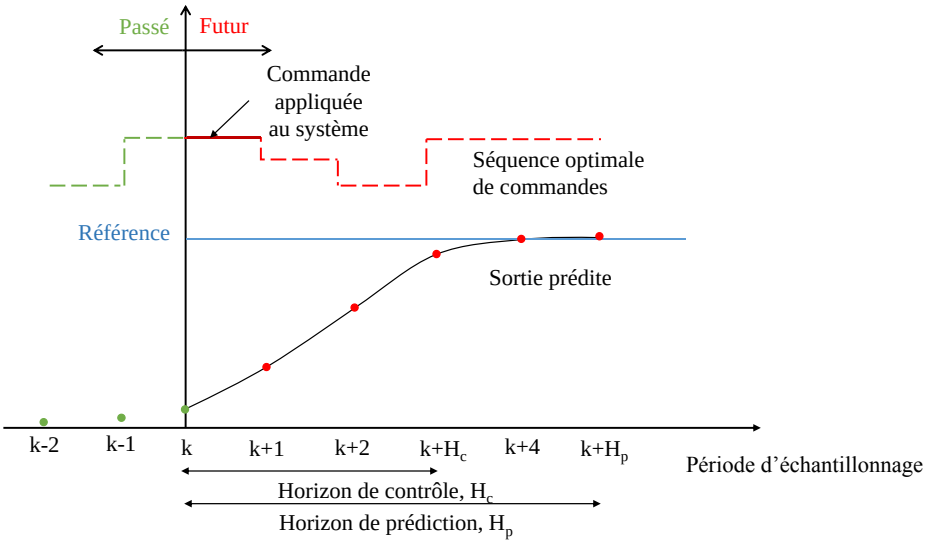


Figure 3-6 Principe fondamental de la commande MPC

3.4.1.1 Modèle du robot

Le modèle d'état discret du robot utilisé est régi par les équations (3.1). Le vecteur d'état du système robot est donné par le vecteur $X(k)=\left[x(k)\ y(k)\ \psi(k)\right]^T$.

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ y(k+1) \\ \psi(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(k) \\ y(k) \\ \psi(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v(k)\cos(\psi(k))\Delta t \\ v(k)\sin(\psi(k))\Delta t \\ \omega(k)\Delta t \end{bmatrix} \qquad (3.1)$$

Avec :

- $P(k) = \left[x(k)\ y(k)\right]^T$: position du robot $\left[m\right]$
- $\psi(k)$: orientation du robot $\left[rad\right]$
- Δt : temps d'échantillonnage $\left[s\right]$
- $v(k)$: vitesse linéaire du robot $\left[m/s\right]$
- $\omega(k)$: vitesse angulaire du robot $\left[rad/s\right]$

Les vitesses linéaire et angulaire du robot sont calculées à partir des vitesses angulaires de chaque roue (3.2).

$$\begin{bmatrix} v(k) \\ \omega(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2L} & \frac{1}{2L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_g(k) \\ v_d(k) \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

Avec :

- $2L$: distance entre les deux roues $\left[m\right]$
- v_g et v_d : vitesses linéaires de la roue gauche et droite respectivement $\left[rad.s^{-1}\right]$
- D : diamètre de la roue [m]
- Δt : période d'échantillonnage [s]

Le modèle cinématique du robot utilisé peut être assimilé à un robot à deux roues (cf. Figure 3-7).

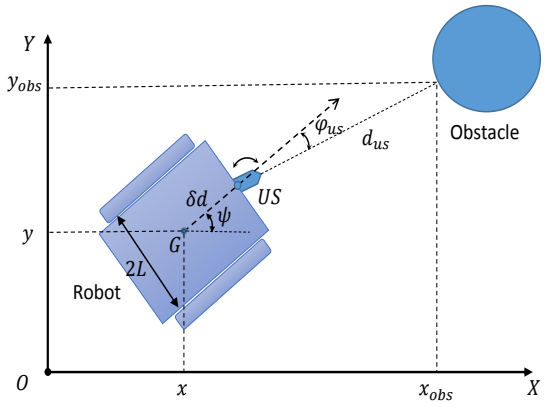


Figure 3-7 Modèle cinématique du robot. « US » capteur à ultrasons

Ce modèle est utilisé dans la conception de la loi de commande MPC. Celle-ci fait appel à d'autres éléments, à savoir, la fonction coût à minimiser, les contraintes (telles que les limitations physiques du robot) et l'algorithme d'optimisation pour le calcul de la commande optimale menant le robot à la position souhaitée.

3.4.1.2 Synthèse de la loi de commande prédictive pour le robot

De nombreuses formulations mathématiques et études théoriques liées à la commande MPC sont présentées dans la littérature. Dans le cadre de cette thèse, nous avons adopté la stratégie et la formulation proposées par (Marzat, Piet-Lahanier, & Kahn, 2014).

3.4.1.2.1 Stratégie de la commande MPC appliquée au robot

Un schéma bloc pouvant caractériser la commande MPC implémentée dans le robot est représentée sur la Figure 3-8.

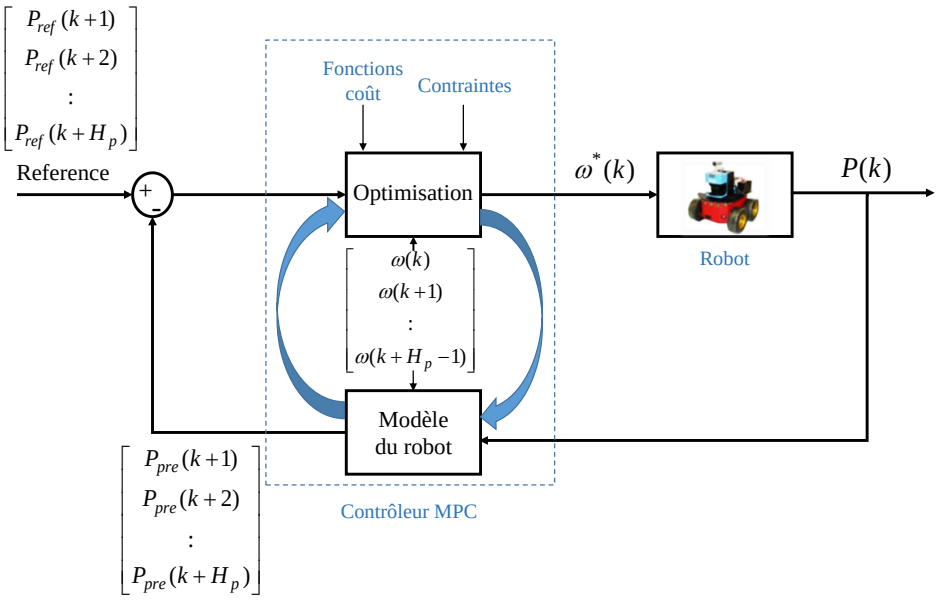


Figure 3-8 Schéma bloc de la commande MPC, P_{ref} (positions de référence), P_{pre} (positions prédites), ω (commandes), $\omega^*(k)$ (le premier élément de la séquence de commandes optimale) et $P(k)$ (la position du robot à l'instant k)

Elle est définie par les points suivants :

- À chaque instant k, le modèle présenté dans la section 3.4.1.1 est utilisé pour prédire les futures positions du robot à chaque étape de l'horizon de prédiction $P_{pre}(k+i\,|\,k)$, $i=1,2...H_p$. Celles-ci sont calculées en fonction de chaque séquence de commandes candidate (cf.) $u(k+i\,|\,k)=\omega(k+i\,|\,k)$, $i=0,1...H_p-1$.

- Une trajectoire de référence (ensemble de points) $P_{ref}(k+i)$, $i=1,2...H_p$ est définie et mise à jour en fonction de l'objectif (position) à atteindre et de la position à l'instant k du robot.
- Un problème d'optimisation est résolu afin de minimiser une fonction coût J. La solution détermine la séquence optimale de commandes permettant de minimiser l'erreur entre les positions de référence et les positions prédites du robot.
- À l'instant k, uniquement la première valeur $\omega^*(k)$ de la séquence de commandes optimale $\omega^*(k+i\,|\,k)$, $i=0,1...H_p-1$, est appliquée au robot (les autres valeurs sont ignorées). Suite à l'exécution de cette commande, le robot parcourt une certaine distance.
- À la période d'échantillonnage suivante, la nouvelle position du robot est mesurée. Compte tenu de certaines perturbations (non mesurées), la position du robot pourrait ne pas correspondre à celle prédite. À cet effet, l'horizon de prédiction H_p est avancé d'une étape et la procédure précédente est répétée. Une nouvelle commande optimale est alors déterminée et appliquée au robot à l'instant $k+1$. Ceci est connu comme le concept de l'horizon fuyant.

3.4.1.2.2 Formulation de la fonction coût

La fonction coût J à minimiser est composée de trois fonctions coût différentes : la fonction coût de navigation J_{nav}, la fonction coût de sécurité J_{sec} et la fonction coût de contrôle J_{ctrl}. Ces fonctions coût sont caractérisées par des coefficients de pondération $W_{coût}$, $coût \in \{nav, \text{sec}, ctrl\}$. Ils sont calculés empiriquement de façon à gérer les priorités entre chaque fonction coût.

Une analogie est définie entre les différentes fonctions coût et les fonctions du SF su robot au LoA autonome à chaque niveau d'activité (cf. Figure 3-9).

$$J(k) = J_{nav}(k) + J_{\text{sec}}(k) + J_{ctrl}(k) \qquad (3.3)$$

L'analyse et la prise de décision au niveau tactique sont représentées par le coût de navigation (cf. rectangles bleus sur la Figure 3-9). L'analyse et la prise de décision au niveau opérationnel sont définies par le coût de sécurité (cf. rectangles rouges sur la Figure 3-9).

L'implémentation d'action est traduite par le coût de contrôle (cf. rectangles verts sur la Figure 3-9).

$$J(k) = J_{nav}(k) + J_{\sec}(k) + J_{ctrl}(k)$$

SF tactique : la reconnaissance et le choix de la trajectoire

SF opérationnel : le contrôle de la trajectoire avec l'évitement d'obstacles

0 1 1 1 1 1 1 1

Figure 3-9 Analogie entre les fonctions coûts utilisées dans le MPC et le SF du robot au LoA autonome. Chaque ensemble des quatre réctangles contenant des 0 et 1 représente les quatre fonctions du SF

Le Coût de navigation J_{nav}, prend en charge le déplacement du robot. Il a pour objectif de contrôler la manière dont le robot va atteindre les points de passage désirés (points de référence). La fonction de coût de navigation est donnée par la formule (3.4).

$$J_{nav}(k) = W_{nav} \sum_{n=k+1}^{k+H_p} \left\| P_{pre}(n \mid k) - P_{ref}(n \mid k) \right\|^2 \tag{3.4}$$

Les positions de référence sont définies par l'équation (3.5).

$$P_{ref}(n \mid k) = P(k) + (n-k)v \frac{P(k) - P_{but}}{\left\| P(k) - P_{but} \right\|} \Delta t \tag{3.5}$$

Avec :

- P_{but} : position finale désirée à atteindre par le robot.
- $P_{ref}(n \mid k)$ et $P_{pre}(n \mid k)$: positions de références et positions prédites du robot à l'étape n, à partir de l'instant k.

Le Coût de sécurité $J_{\sec}$, concerne l'évitement d'obstacles. La fonction de coût $J_{\sec}$ assure l'évitement d'obstacles en pénalisant le fait de s'approcher d'un obstacle au-delà d'une distance souhaitée. Pour ce faire, la fonction hyperbolique est utilisée. Le coût de sécurité est défini par la formule (3.6).

$$J_{\sec}(k) = W_{\sec} \sum_{i=1}^{N_{obs}} \sum_{n=k+1}^{k+H_p} \frac{1 - \tanh((d^i_{pre}(n) - \beta_i)\alpha_i}{2} \tag{3.6}$$

Avec : N_{obs} le nombre d'obstacles prédéfinis, d^i_{pre} la distance prédite entre le robot et l'obstacle i. Les paramètres α et β sont définis par les équations (3.7).

$$\begin{cases} \alpha_i = 6(d_{\sec} - d_{des})^{-1} \\ \beta_i = 0.5(d_{\sec} - d_{des}) \end{cases} \quad (3.7)$$

d_{des} et $d_{\sec}$ représentent respectivement la distance désirée et la distance de sécurité par rapport à un obstacle.

Dans leur approche, les auteurs Marzat et *al*. (2014) ont prédéfini les positions des obstacles supposés connus. Dans le cadre de la gestion de crise, les obstacles sont inconnus. Les données du capteur à ultrasons du robot sont utilisées afin de calculer la position de chaque obstacle détecté. La position d'un obstacle détecté $\{x_{obs}, y_{obs}\}$ est donnée par les équations (3.8).

$$\begin{cases} x_{obs} = x(k) + \delta d \cos(\psi(k)) + d_{us} \cos(\psi(k) + \varphi_{us}(k)) \\ y_{obs} = y(k) + \delta d \sin(\psi(k)) + d_{us} \sin(\psi(k) + \varphi_{us}(k)) \end{cases} \quad (3.8)$$

Avec : $\{x(k), y(k)\}$ position du robot à l'instant k, $\psi(k)$ son orientation à l'instant k, $\varphi_{us}(k)$ l'orientation du capteur à ultrasons à l'instant k et δd distance entre le centre de gravité et l'avant du robot. Tous ces paramètres sont représentés sur la Figure 3-7.

Le Coût de contrôle J_{ctrl}, vise à modérer le contrôle et ainsi limiter la consommation énergétique du robot.

$$J_{\omega}(k) = W_{\omega} \sum_{n=k}^{k+H_p-1} (u_{\omega}(n))^2 \quad (3.9)$$

L'algorithme du MPC nécessite à chaque itération de prédire des trajectoires à partir d'un certain nombre de séquences de commandes prédéfinies. À cet effet, le temps de calcul peut être important en fonction du nombre de séquences candidates utilisées. Afin de réduire le temps de calcul, on génère un ensemble de séquences de commandes, dont la commande u (vitesse angulaire ω) constante dans $[1 \quad H_c]$ et nulle dans $[H_c \quad H_p]$, pour éviter de générer plus de séquences candidates et d'appliquer des commandes différentes à chaque itération dans H_c. Cette simplification ne dégrade pas les capacités du robot, car celui-ci parcourt de courtes distances entre deux temps d'échantillonnage et la valeur maximale de la commande n'est pas élevée. Les séquences de commandes candidates incluent les valeurs maximale et minimale de la commande afin d'exploiter toutes les capacités du robot. Elles incluent aussi la commande nulle afin de permettre au robot de continuer sur la même trajectoire. Cet algorithme est adapté à la capacité limitée du type de robot utilisé pour les systèmes homme-robots conçus dans cette

thèse (cf. chapitre 4 et chapitre 5). Les séquences de commandes candidates sont obtenues par discrétisation entre $u_{\min}$ et $u_{\max}$ suivant les formules (3.10) et (3.11).

$$\Omega = \frac{u_{\min} + (u_{\max} - u_{\min}).\gamma}{n_u} \;;\; \gamma \in [0, n_u] \tag{3.10}$$

$$u_{\max} = \frac{v + \omega_{\max} r}{L},\; u_{\min} = \frac{v + \omega_{\min} r}{L} \tag{3.11}$$

Avec :

- $u_{\min}$ et $u_{\max}$: valeurs minimale et maximales de la commande
- n_u : nombre de séquences de commandes (choisi de telle sorte à pouvoir réaliser le calcul des trajectoires prédites dans la durée du temps d'échantillonnage)
- γ : numéro de l'étape
- $\omega_{\max}$ et $\omega_{\min}$: vitesses de rotation maximale et minimale (déterminées en fonction des caractéristiques du moteur)

Les résultats de la simulation et de l'expérimentation sont donnés dans la section suivante.

3.4.1.3 Résultat

Le bon fonctionnement de l'algorithme a été testé en simulation (sous Matlab). L'objectif est d'atteindre une position prédéfinie tout en évitant un obstacle. Dans ce test de simulation, la vitesse linéaire v du robot est considérée constante pour la simplicité du modèle. La trajectoire obtenue est présentée sur la Figure 3-10.

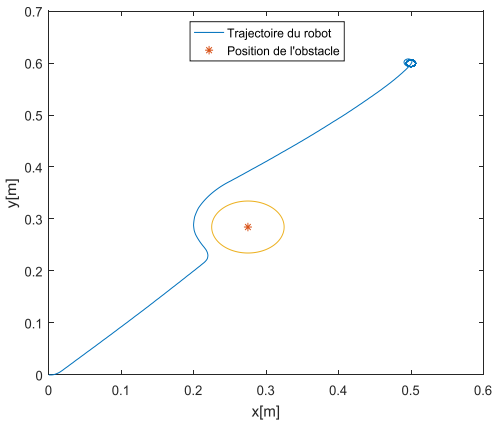


Figure 3-10 Trajectoire du robot pour atteindre un objectif ($P_{but} = \{0.5, 0.6\}$) tout en évitant un obstacle ($P_{obs} = \{0.27, 0.28\}$). Le rayon du cercle représente la distance de sécurité d_{sec} .

3.5 Conclusion

Ce chapitre a proposé une approche générique pour la définition des LoA. Cette méthodologie utilise les principes de coopération homme-machine afin d'évaluer toutes les interactions possibles entre l'humain et le robot, ou l'humain et la machine en général. Un exemple de scénario est fourni afin d'illustrer et d'expliquer son utilisation. L'allocation dynamique des fonctions et l'attribution de l'autorité entre l'humain et la machine sont gérées par le biais des LoA adaptables. L'approche proposée souligne toutes les étapes à suivre pour anticiper tout problème pouvant survenir lorsque l'humain coopère avec un système automatisé. Cette approche s'appuie sur des fonctions génériques qui traitent des compétences et capacités des agents à réaliser une tâche (SF) et à coopérer avec les autres agents (SC). La définition proposée sera évaluée principalement dans le cadre de la robotique mobile de service. Les LoA identifiés seront appliqués à deux contextes différents et implémentés sur deux plateformes expérimentales dans les prochains chapitres 4 et 5.

4 IMPLEMENTATION ET EVALUATION DE LA COOPERATION HOMME-ROBOTS DANS LE CADRE DE LA GESTION DE CRISE

4.1 Introduction

Ce chapitre est dédié à l'implémentation et l'évaluation des concepts théoriques de la coopération homme-robots et des niveaux d'automatisation (LoA) adaptables proposés, dans le cadre de la gestion de crise et plus particulièrement lorsqu'elle est gérée par les SDIS. Le chapitre est organisé en quatre sections. La section 4.2 décrit l'implémentation du système homme-robots. La section 4.3 présente la méthode d'évaluation expérimentale de la coopération entre l'opérateur humain et les robots, ainsi que l'adaptation des LoA dans une mission de sauvetage. La section 4.4 présente les résultats obtenus de l'étude expérimentale et la section 4.5 une conclusion.

Présentation du contexte

Dans une mission de gestion de crise, les robots mobiles peuvent aider les pompiers à localiser de potentiels dangers, à rechercher et à secourir les victimes d'un sinistre. La mission consiste à trouver les victimes aussi rapidement que possible dans des conditions difficiles,

instables et, dangereuses pour les pompiers. Dans ce contexte, les robots mobiles ont la capacité d'explorer les zones sinistrées, en se déplaçant là où il serait risqué pour les humains de se rendre. Dans ce cadre, les pompiers parisiens ont utilisé un robot mobile pour faire baisser la température à l'intérieur de la cathédrale Notre-Dame de Paris. La gestion de crise peut être considérée comme une gestion d'environnement dynamique; en effet, la crise est un événement qui a des caractéristiques qui évoluent dans le temps (Rogalski, 2004). Compte tenu de ce contexte dynamique, les humains et les robots doivent interagir et coopérer efficacement afin de s'aider mutuellement. C'est dans cette optique que le projet SUCRé (pour sûreté de fonctionnement et résilience pour la gestion et le contrôle coopératifs des systèmes sociotechniques) a été mis en place en partenariat entre : le LAMIH de l'UPHF, le laboratoire GEMTEX de l'école nationale supérieure des arts et industrie textiles de Roubaix, le LGI2A de l'université d'Artois, le laboratoire CRySTAL de l'université Lille 1, l'URIA de l'école des mines de Douai, le CRESTIC de l'université de Reims Champagne Ardenne, les laboratoires Tech-CICO et LM2S de l'université de Technologies de Troyes « Tech-CICO et LM2S ».

Dans ce projet, nous étudions comment des robots peuvent être utilisés pour une mission de gestion de crise réalisée par des pompiers. L'objectif principal du projet est d'étudier et modéliser la coopération homme(s)-robot(s) afin de développer des systèmes d'assistance pour soutenir la coopération au sein des systèmes sociotechniques dans des environnements hostiles (cf. coopération multi-niveau chapitre 2). Cette étude se focalise sur l'étude de la coopération dans et entre les niveaux tactique et opérationnel (cf. bulle bleue ciel Figure 4-1).

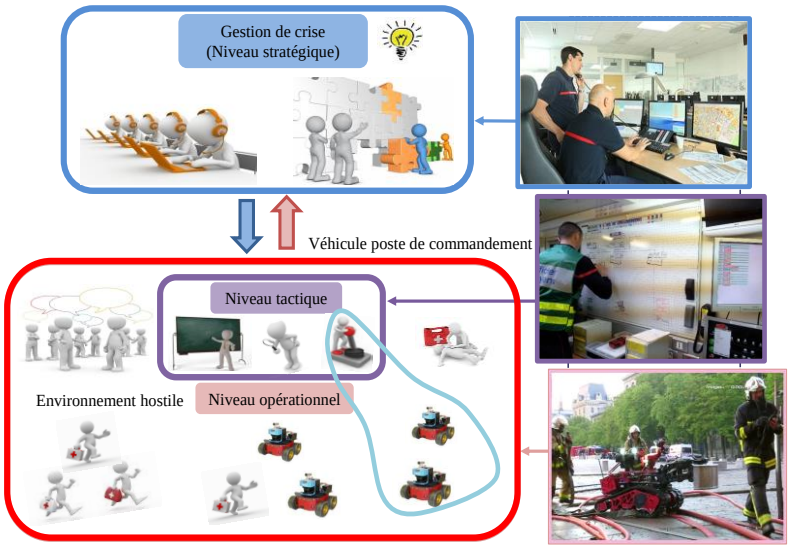


Figure 4-1 Gestion de crise et niveaux de coopération

Le système homme-robots peut avoir différents LoA en fonction des objectifs et de

l'environnement. L'opérateur humain se trouvant dans le véhicule du poste de commandement à proximité de la zone de crise, doit connaître le LoA du robot et les interactions en cours. L'opérateur humain doit être assisté pour gérer l'allocation de fonctions définie par l'adaptation des LoA afin de faire face aux évènements imprévus.

Coopération homme-robots

La coopération au sein du système homme-robots est conçue à partir du modèle de coopération (cf. Figure 4-2). Deux niveaux de coopération sont pris en compte : tactique et opérationnel. Au niveau tactique, les agents gèrent la mise à jour du plan de mission en modifiant la trajectoire de chaque robot pour atteindre des objectifs. Dans le cas de gestion de crise chez les pompiers, nous admettons que le plan de mission est établi par la cellule de gestion de crise (niveau stratégique). Afin de réaliser une mission de sauvetage, les agents doivent réaliser une tâche de reconnaissance qui consiste par exemple à trouver des victimes ou détecter des dangers (niveau tactique). Les robots doivent alors être équipés de capteurs pour le traitement d'images pour être dotés du SF nécessaire pour l'identification d'objets à rechercher.

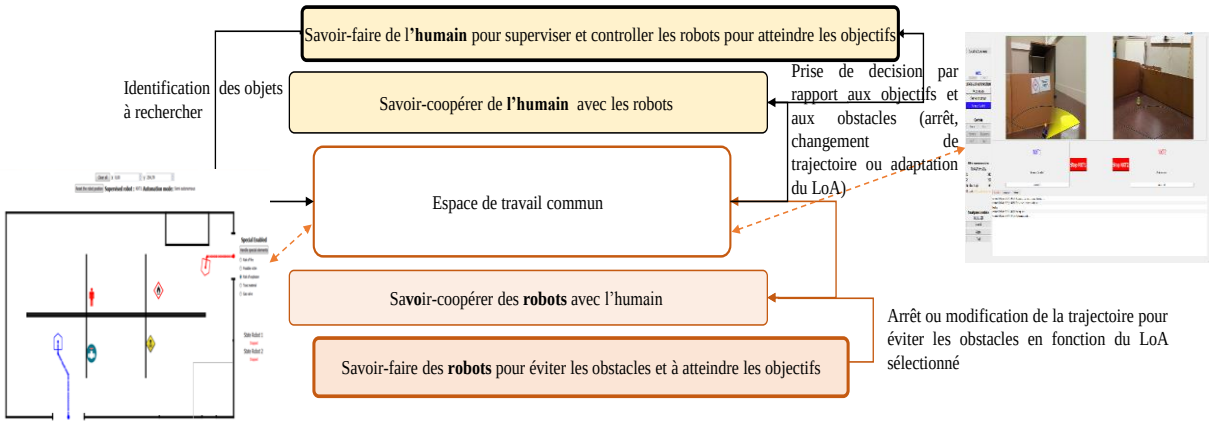


Figure 4-2 Modèle de coopération entre l'humain et les robots, en fonction de leurs savoir-faire et savoir-coopérer

Dans cette thèse les robots utilisés ne disposent pas de ce type de capteurs, ils n'ont donc pas de SF ni de SC pour la reconnaissance. Néanmoins, en fonction du LoA les robots peuvent se déplacer et choisir une trajectoire pour atteindre les objectifs (direction ou objet) définis par l'opérateur humain. Au niveau opérationnel, les robots sont capables de détecter et d'éviter les obstacles en modifiant la trajectoire ou en s'arrêtant. Cependant, en fonction du LoA, les robots peuvent être en désaccord avec la décision ou l'action de l'opérateur humain. De même l'opérateur humain peut être en désaccord avec le déplacement des robots, ce qui peut l'amener à imposer ou modifier la trajectoire du robot en adaptant le LoA via l'ETC. Lorsque la distance à un obstacle est inférieure à un seuil, l'autorité revient au robot qui impose un arrêt ou exécute

sa propre décision en fonction de la situation.

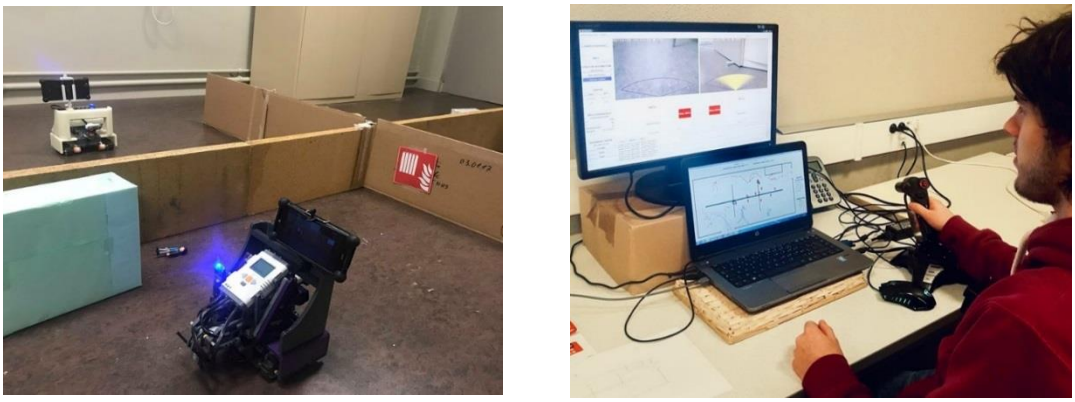
4.2 Implémentation

Une plateforme expérimentale a été développée de façon à évaluer la coopération homme-robots et l'adaptation des LoA. Celle-ci comprend principalement deux robots et un poste de contrôle/commande pour un opérateur humain. L'implémentation technique des LoA et la conception de l'ETC du système sont décrits ci-après, ainsi que l'établissement de la communication entre le poste de contrôle/commande et les robots est présentée.

4.2.1 Plateforme expérimentale

Le matériel utilisé pour la mise en œuvre du système homme-robots doit permettre d'exécuter la partie logicielle du système qui gère les tâches tactiques et opérationnelles d'une mission de gestion de crise. Dans le cadre d'une mission de sauvetage réalisée par des pompiers, deux composantes matérielles distinctes sont nécessaires (cf. Figure 4-3), un poste de contrôle/commande situé au niveau tactique de l'activité dans le véhicule du poste de commandement (dans ce travail, un ordinateur portable et un joystick) (cf. Figure 4-3(b)) et deux robots mobiles au niveau opérationnel (cf. Figure 4-3 (a)).

Le poste de contrôle/commande permet aux opérateurs humains de suivre et de mettre à jour le plan de la mission établi par le niveau stratégique (cellule de gestion de crise), en fonction de nouveaux évènements ou objectifs. Les opérateurs humains prennent le contrôle et exécutent à distance certaines tâches opérationnelles si besoin. Une autre partie du système, positionnée au niveau opérationnel, comprend deux robots mobiles (cf. Figure 4-3 (a)). Ils sont capables de recevoir et de transmettre les informations depuis et vers le niveau tactique. Ils appliquent aussi les décisions prises par l'opérateur humain ou les leurs suivant le LoA choisi.



(a) Robots mobiles **(b) Ordinateur et joystick**

Figure 4-3 Le matériel utilisé pour créer le système homme-robots. La communication entre l'ordinateur et les robots se fait via des modules XBee

Les deux parties logicielles du poste de contrôle/commande et des robots fonctionnent en parallèle et communiquent en temps réel. Le poste de contrôle/commande et les robots étant distants, la plateforme doit être munie d'une communication sans fil pour l'échange d'informations. Cette section décrit ces différentes parties.

4.2.1.1 Robots mobiles

Les solutions technologiques permettant le développement des SF et SC des robots sont déterminées (cf. Figure 4-4). Deux robots mobiles ont été configurés à partir d'un ensemble de composants fournis dans le pack LEGO MINDSTORMS NXT Education[5] (cf. Figure 4-5).

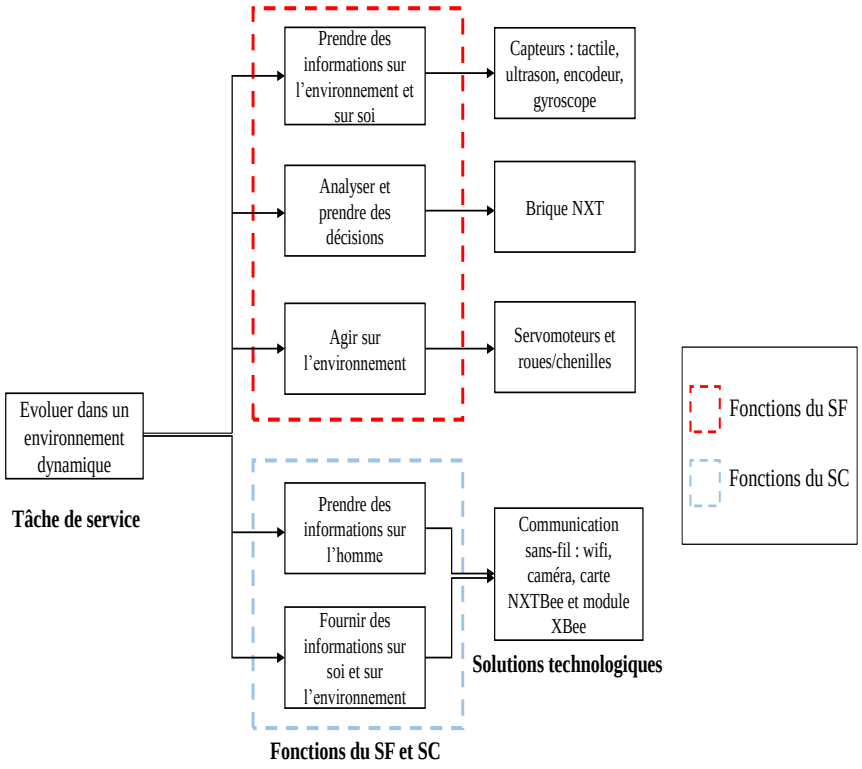


Figure 4-4 Identification des solutions technologiques pour le développement des différentes fonctions du SF et SC par le robot

Les différents composants du robot sont classés suivant les fonctions du SF et SC qu'ils réalisent. Ils sont présentés ci-dessous.

- SF (prise d'informations) : le robot est équipé d'un ensemble de capteurs lui permettant de percevoir et de prendre des informations sur l'environnement et sur lui-même. *Un capteur tactile* est placé à l'arrière du robot pour détecter des obstacles en marche arrière (selon que le capteur est enfoncé ou relâché) (cf. Figure 4-5(b)) . *Un*

[5] https://www.robot-advance.com/cat-lego-mindstorms-education-nxt-116.htm

capteur à ultrasons est placé à l'avant du robot, à mi-hauteur (cf. Figure 4-5 (a)) et permet au robot de percevoir et de calculer la distance le séparant d'un obstacle. *Un encodeur* (capteur de rotation) placé dans chaque moteur permet de mesurer les rotations du moteur en degrés. Enfin *un capteur gyroscopique* installé au centre de gravité du robot permet de mesurer ses mouvements et son sens de rotation (cf. Figure 4-5 (c).

- SF (analyse et prise de décision) : la brique NXT constitue le cerveau du robot (cf. Figure 4-5 (b)). Cette brique contrôlée par ordinateur permet de traiter des données et de doter le robot d'un comportement programmable et « intelligent » lui permettant d'analyser et de prendre des décisions. Des algorithmes de programmation sont à télécharger dans cette brique à partir d'un ordinateur (des détails techniques sont fournis en Annexe A).
- SF (implémentation d'action) : le robot est composé de trois servomoteurs lui permettant d'agir et d'effectuer des mouvements précis et homogènes grâce aux encodeurs intégrés (cf. Figure 4-5 (c)). Il se déplace avec un système de chenilles. Ceci permet d'assurer un meilleur équilibre et de concentrer toute la masse sur le centre du robot (centre d'inertie situé au centre de la structure) et de limiter les glissements.
- SC (échange d'informations avec l'opérateur humain) : un smartphone est monté sur le robot de façon à lui permettre de filmer son environnement et de remonter le flux vidéo à l'opérateur humain sur l'ETC (cf. Figure 4-5 (a) et (b) caméras dorsale et frontale). Un module XBee, monté sur une carte NXTBee (cf. Figure 4-5 (b)) permet d'établir des communications avec d'autres modules XBee (pour plus d'informations sur les caractéristiques techniques voir Annexe A).

Afin de solidifier la structure du robot, une coque en plastique épais a été imprimée à l'aide d'une imprimante 3D (cf. Figure 4-5 (a)).

Les fonctions du SF et SC du robot ont été implémentées et sont accessibles suivant le LoA sélectionné. Ce programme est composé d'un ensemble de tâches (programmation multitâche) sous RobotC (version 4.3 sous windows 7). Ce langage de programmation, dédié à la robotique, est basé sur le langage C.

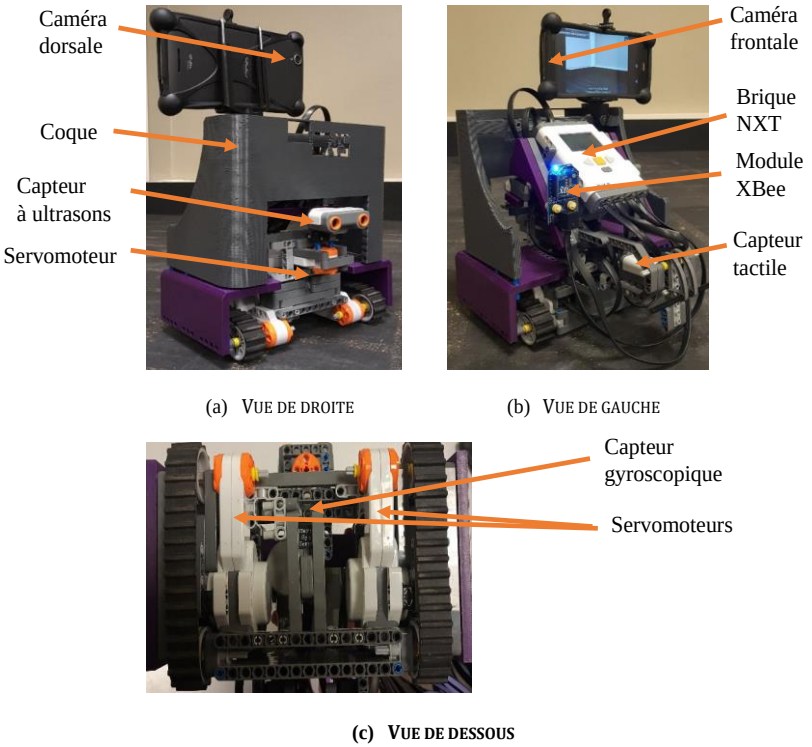


Figure 4-5 Les différents composants des robots mobiles utilisés pour l'implémentation

4.2.1.2 Implémentation des niveaux d'automatisation

Trois LoA sont implémentés dans le robot : autonome, semi-autonome et manuel, identifiés dans le chapitre 3. Chaque niveau est représenté par une tâche informatique dans le programme du robot. En fonction du LoA sélectionné par l'opérateur humain depuis le niveau tactique, la tâche correspondante à ce niveau est lancée. Celle-ci traduit le SF et le SC du robot en fonction du LoA sélectionné. La détection d'obstacles constitue une tâche du programme qui s'exécute en parallèle avec les autres tâches.

4.2.1.2.1 Détection d'obstacles

La tâche de détection d'obstacles permet de gérer la vitesse et l'angle de rotation du capteur à ultrasons par rapport à l'axe central du robot.

Il convient de noter que les objets de grandes tailles avec des surfaces dures permettent d'obtenir les meilleures lectures du capteur à ultrasons. Inversement, les obstacles en tissu doux ou courbés comme une balle sont difficiles à détecter. Compte tenu des éventuelles limitations de ce capteur, une optimisation de l'algorithme de détection d'obstacles est réalisée. Le capteur à ultrasons est placé sur un moteur (à l'avant du robot) afin de pouvoir réaliser des rotations latérales du capteur. A l'état initial, le capteur à ultrasons est centré sur l'axe central du robot. Ensuite, le moteur le fait tourner vers la gauche ou vers la droite en fonction de l'angle (φ_{US})

et du sens de rotation (regard) (cf. Figure 4-6). Les rotations se font jusqu'à $Enc_{\max}$ gérées à partir de la mesure de l'encodeur du moteur. Dès que la valeur maximale de l'encodeur est atteinte le moteur arrête de tourner et change (ou non) de sens de rotation. Le sens de rotation est obtenu en fonction de la position angulaire du capteur à ultrasons φ_{US} à la fin d'une rotation de $|Enc| = Enc_{\max}$ Le moteur tourne jusqu'au moment où le capteur à ultrasons détecte un obstacle à une distance inférieure à une distance maximale.

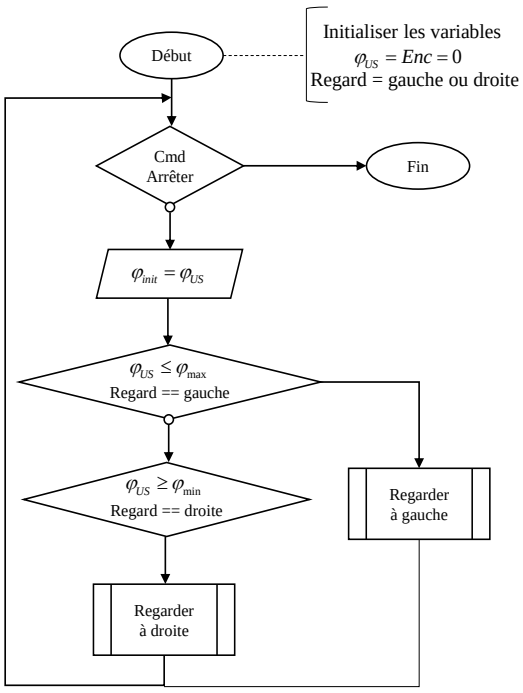


Figure 4-6 Logigramme du programme principal de détection d'obstacles

Si la distance à l'obstacle détecté est inférieure à une distance minimale, l'obstacle est dit trop proche. L'orientation de l'obstacle est calculée à partir de la position du capteur à ultrasons (obstacle à gauche, obstacle à droite ou obstacle en face). L'orientation et la proximité de l'obstacle détecté sont mises à jour et utilisées par les autres tâches du programme qui gèrent le déplacement et l'évitement d'obstacles par le robot. Selon le LoA sélectionné et la proximité de l'obstacle, le robot s'arrête ou évite de manière autonome l'obstacle tout en continuant de le « regarder ». Ce comportement ressemble au comportement humain qui modélise l'intention du robot à éviter l'obstacle. Le logigramme du programme de rotation du capteur à ultrasons est donné dans l'Annexe B.

4.2.1.2.2 LoA autonome

Après validation en simulation de la commande prédictive à base de modèle présentée dans le chapitre 3, le même algorithme est implémenté sur le robot. Néanmoins pour une

meilleure précision en pratique, le modèle du robot est modifié afin de calculer les positions réelles du robot à chaque période d'échantillonnage. À cet effet, les données des encodeurs sont utilisées pour calculer les vitesses linéaire et angulaire du robot suivant la formule (4.1).

$$\begin{bmatrix} v_g(k) \\ v_d(k) \end{bmatrix} = \frac{\pi D}{\Delta t} \begin{bmatrix} Ntr_g \\ Ntr_d \end{bmatrix} \tag{4.1}$$

- Avec : $Ntr_g = \frac{Enc_g(k) - Enc_g(k-1)}{Enc_{/tr}}$, $Ntr_d = \frac{Enc_d(k) - Enc_d(k-1)}{Enc_{/tr}}$: nombre de tours des roues gauche et droite respectivement. Enc_g et Enc_d : mesures des encodeurs gauche et droit respectivement . $Enc_{/tr}$: valeur de l'encodeur par tour complet de roue (360 pour les moteurs Lego-NXT).

La commande optimale est appliquée aux moteurs gauche et droit du robot en signal PWM (Pulse Width Modulation) en accord avec l'équation (4.2).

$$\omega_{d,g} = \left(\frac{v \pm \omega^*(k) L}{r} \right) \frac{PWM_{\max}}{\omega_{\max}} \tag{4.2}$$

- Avec : $\omega_{d,g}$: vitesses angulaires appliquées aux moteurs droit et gauche du robot

4.2.1.2.3 LoA semi-autonome

Les logigrammes de l'algorithme du niveau semi-autonome sont donnés sur les Figure 4-7 et Figure 4-8.

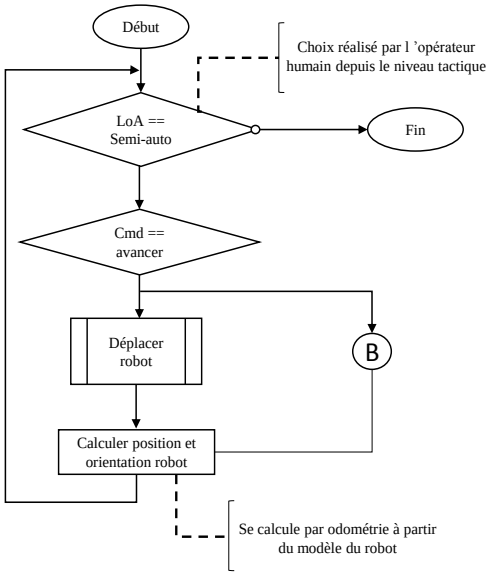
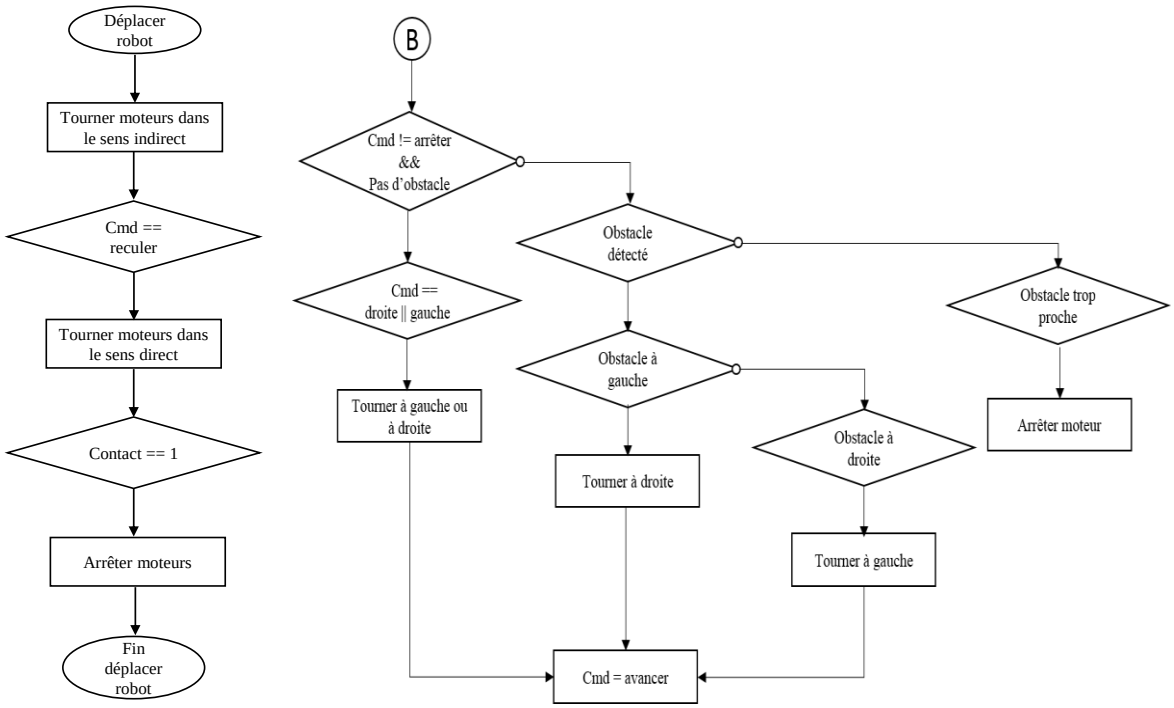


Figure 4-7 Logigramme du programme principal du LoA « semi-autonome »

À ce LoA, le robot évolue dans l'environnement opérationnel en évitant les obstacles sans connaitre les objectifs de l'opérateur humain. Cependant, celui-ci peut corriger la trajectoire du robot en lui envoyant une nouvelle commande (décision) quant à l'action à mettre en œuvre par ce dernier (avancer, reculer, tourner à gauche, tourner à droite ou s'arrêter). Si le robot rencontre des problèmes pour éviter un obstacle trop proche, il s'arrête et alerte l'opérateur humain par un message « arrêté » qui s'affiche sur l'ETC et une couleur rouge de la surimpression de son radar sur le retour caméra de l'interface de contrôle (cf. Figure 4-11).



(a) Déplacer robot **(b) Partie B du programme**

Figure 4-8 Logigrammes des parties déplacer robot et B du programme principal

4.2.1.2.4 LoA manuel

Le robot est contrôlé à distance par l'opérateur humain à l'aide d'un joystick. Toutefois, le robot avertit des obstacles à proximité à l'aide de la coloration jaune du radar (cf. Figure 4-11). Si l'opérateur humain ne corrige pas son action après l'avertissement, le robot s'arrête. Le logigramme du LoA manuel du robot est donné sur la Figure 4-9.

Par mesure de sécurité, lorsque l'opérateur humain fait reculer le robot jusqu'à un obstacle, le capteur tactile s'enfonce et le robot s'arrête et empêche l'opérateur humain de le faire reculer davantage.

À chaque LoA, l'état du robot est défini, et communiqué en temps réel à l'opérateur humain. Cet état est déterminé à partir de celui des moteurs gauche et droit du robot. Autrement dit, l'activité du robot dépend de celle des moteurs. Au LoA autonome, lorsque le robot atteint

la cible définie par l'opérateur humain, envoie un message « cible atteinte ».

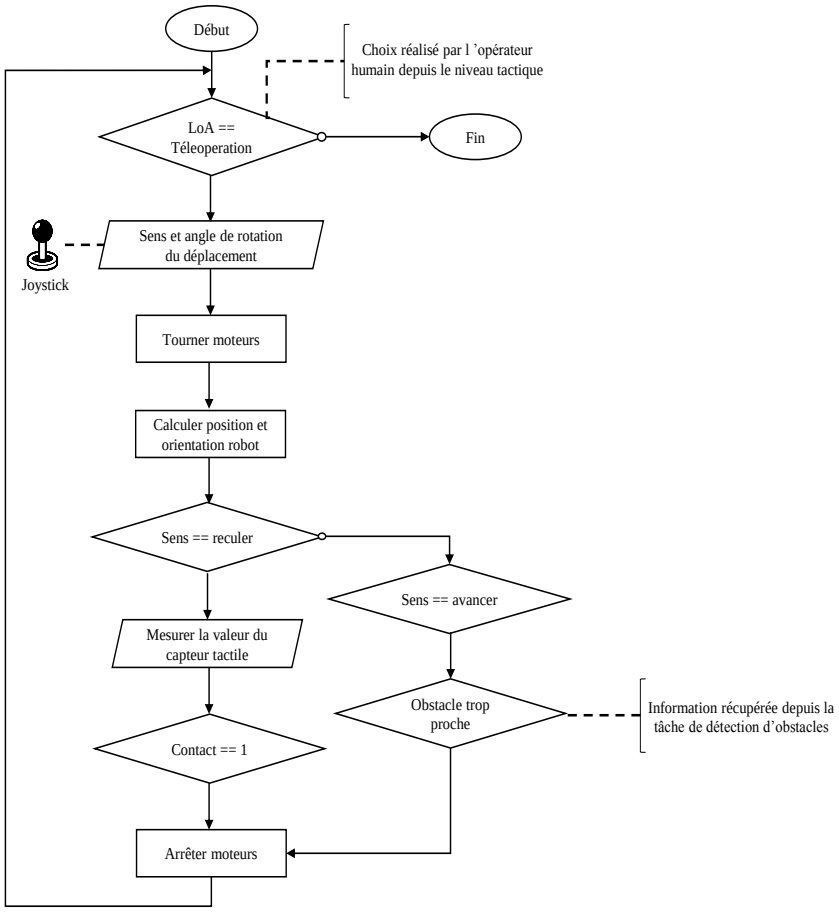


Figure 4-9 Logigramme du LoA manuel

4.2.1.3 Poste de contrôle/commande

La partie de la plateforme expérimentale qui contrôle et supervise le système est composée d'un ordinateur portable, d'un écran et d'un joystick (cf. Figure 4-3 (b)). Le joystick est utilisé pour le contrôle manuel de la partie opérationnelle du système. Il est connecté à l'ordinateur portable via USB. Le reste du contrôle est effectué à l'aide d'une souris pour ordinateur standard. Les logiciels Microsoft Visual Studio 2013 et Qt5 ont été utilisés pour concevoir l'ETC. La programmation est réalisée avec le langage C++. Un programme a été élaboré sur la base de 7 classes en interaction basées sur les fonctions des SF et SC de l'opérateur humain et du robot (cf. Figure 4-10). Ce programme permet d'organiser l'appel aux différentes méthodes et fonctions de chaque classe suivant les données reçues depuis le niveau opérationnel (robots) et les actions de l'opérateur humain effectuées sur l'ETC et le joystick. L'ETC obtenu de l'implémentation est représenté par les Figure 4-11et Figure 4-12.

La classe « écran de contrôle » gère les aspects liés au contrôle des robots. Cette classe interagit avec la classe « robot » et récupère les informations et le flux vidéo de chaque robot

pour les afficher.

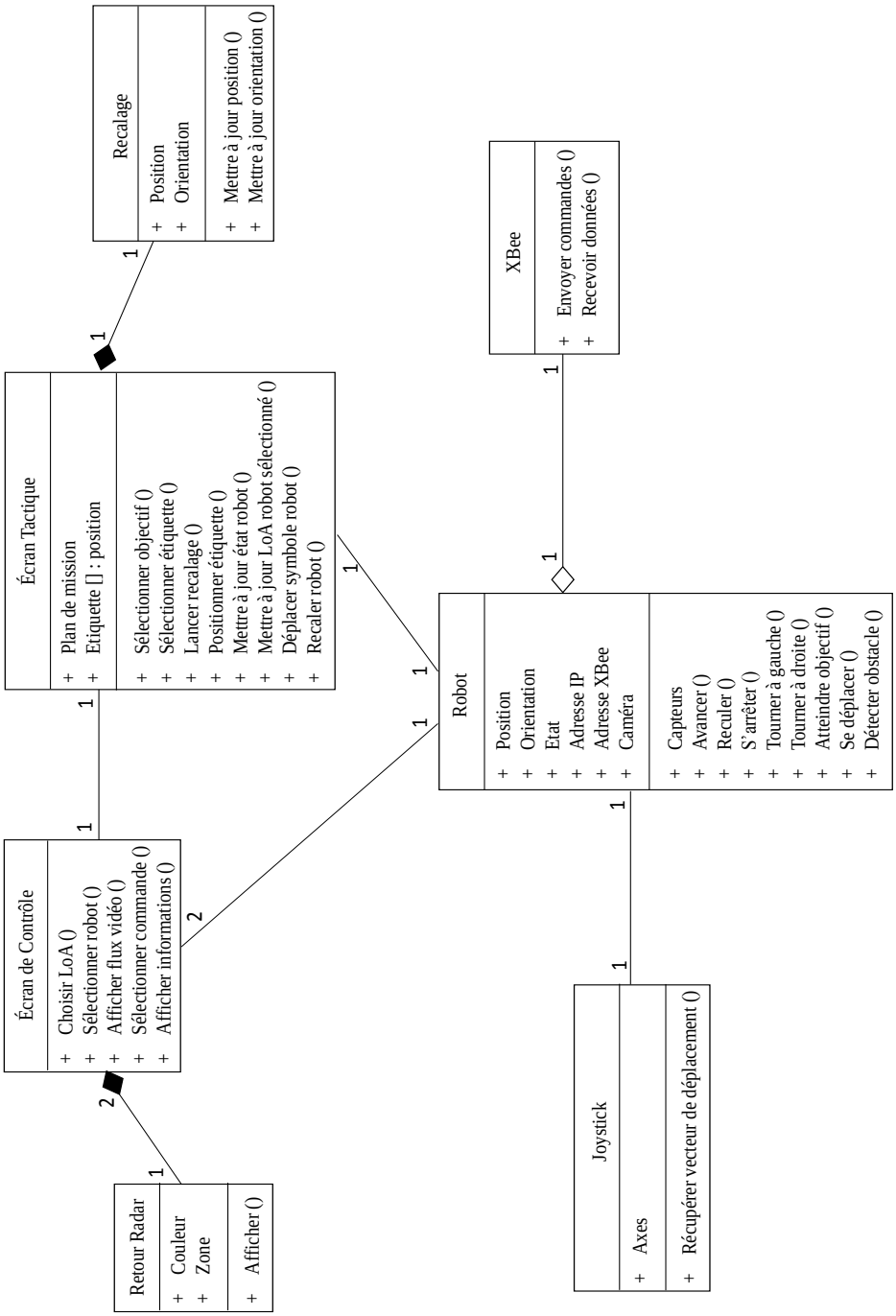


Figure 4-10 Diagramme de classes du programme implémenté dans l'ordinateur

Elle permet de sélectionner un robot, un LoA et des commandes en fonction du LoA sélectionné (« Stop » et « Quit » pour les LoA autonome et LoA manuel; « Stop », « Quit », « Avancer », « Reculer », « Tourner à gauche » et « Tourner à droite » pour le LoA semi-autonome) (cf. partie gauche Figure 4-11).

À partir de l'interface de contrôle, l'opérateur humain peut sélectionner le robot avec

lequel il souhaite interagir et communiquer (un robot à la fois), en cliquant directement sur la zone du retour visuel associé à ce robot (cf. rectangle vert Figure 4-11). L'opérateur humain peut également arrêter chaque robot directement à l'aide des boutons d'arrêt d'urgence clairement visibles sans devoir sélectionner le robot qu'il souhaite arrêter (cf. boutons rouges Figure 4-11).

La classe « retour radar » appartient à la classe « écran de contrôle ». Elle interagit avec la classe « robot » et récupère les données du capteur à ultrasons de chaque robot. Ces informations concernent la proximité d'un obstacle détecté et son orientation (cf. radar Figure 4-11). Suivant ces informations, la couleur (jaune quand l'obstacle est détecté à une certaine distance et rouge quand l'obstacle est trop proche) d'une zone (gauche, droite ou frontale) du radar change.

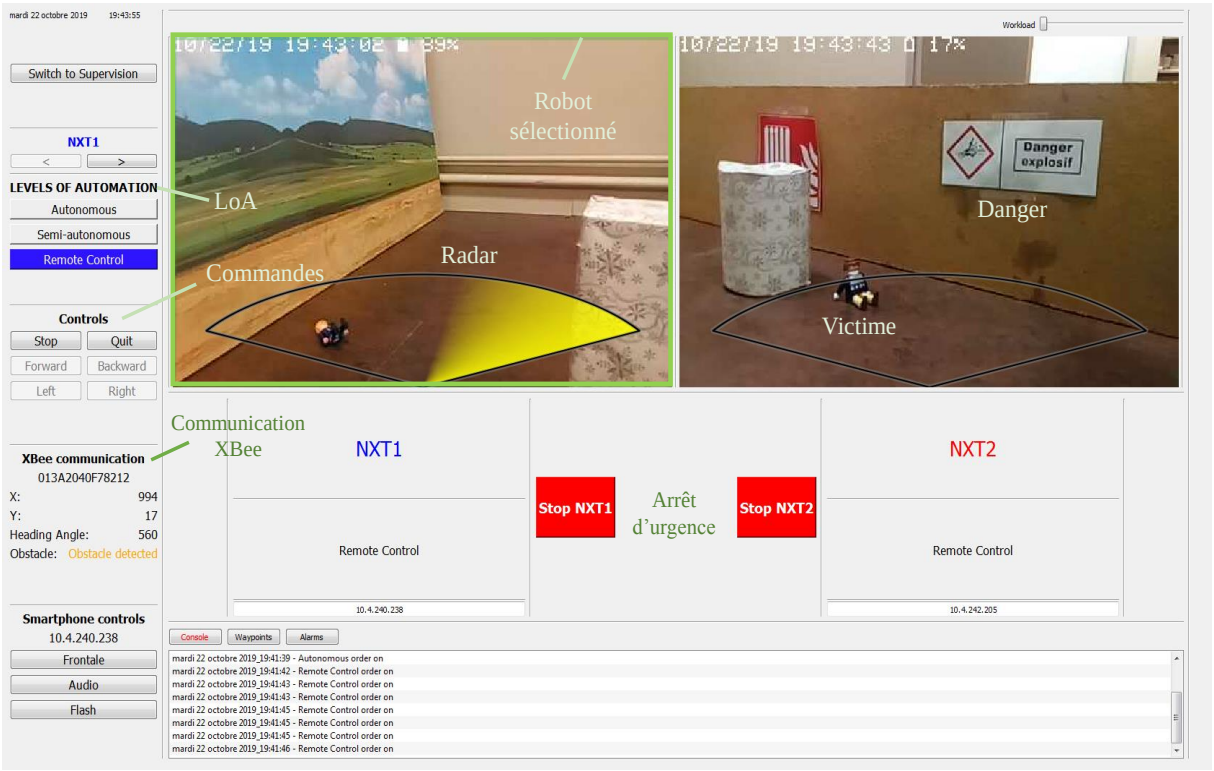


Figure 4-11 Interface de contrôle

La surimpression du radar sur le retour vidéo de chaque robot, exprime le SC des robots. Le radar offre une meilleure interaction et coopération entre l'opérateur humain et les robots. Dans ce sens, l'opérateur humain sera mieux averti de la présence d'obstacles et devra être capable de réagir plus rapidement et efficacement notamment à des situations imprévues (améliore la conscience de la situation de l'opérateur). En effet, des recherches antérieures ont mis en évidence les avantages de ce type d'affichage. Dans le domaine de l'interaction homme-

robot, Baker et *al*. (2004) ont démontré que la plupart des opérateurs humains se concentraient sur la fenêtre du retour vidéo. De par leur étude, Baker et *al*. (2004) ont conclu que fournir plus d'informations sur le retour vidéo réduit la charge cognitive de l'opérateur humain. Dans ce sens, ils proposent d'entourer l'affichage vidéo par des blocs colorés représentant des informations sur l'environnement du robot.

La classe « joystick » récupère le LoA du robot sélectionné en interagissant avec la classe « écran de contrôle ». Si le LoA du robot sélectionné est le LoA manuel, cette classe récupère les actions appliquées sur le joystick, représentées par un vecteur de déplacement. Le vecteur ainsi obtenu est transmis à la classe « robot » qui le traduit en actions.

La classe « écran tactique » affiche la carte de la mission (cf. Figure 4-12). Elle interagit avec la classe « robot » et récupère la position, l'orientation et l'état de chaque robot en temps réel.

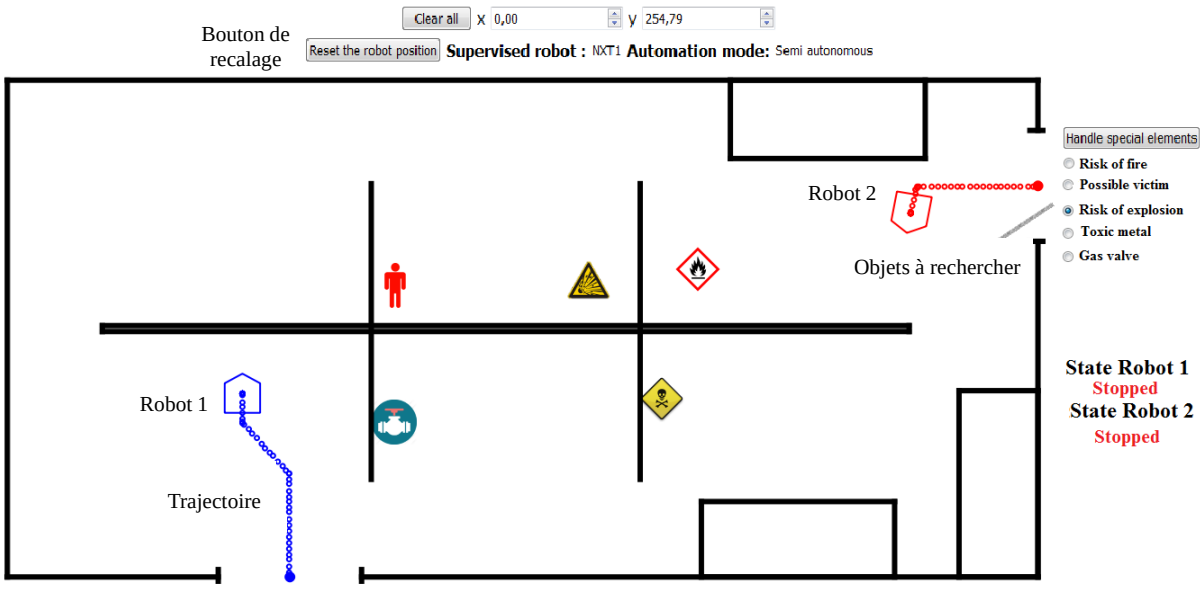


Figure 4-12 Interface tactique

Elle interagit avec la classe « écran de contrôle » pour récupérer le numéro du robot sélectionné et son LoA. La classe « écran tactique » permet de tracer le chemin parcouru par chaque robot d'une couleur différente de celle de l'autre robot (représenté par une succession de points) et d'afficher l'état actuel de chacun et le LoA du robot sélectionné. Les robots sont représentés graphiquement par des symboles de couleurs différentes. Les deux symboles sont de couleurs différentes (cf. Figure 4-12) et renseignent sur la position et l'orientation du robot. Dans le cadre des missions de sauvetage, cette interface offre la possibilité de situer sur la carte les objets et les victimes trouvés. Dans ce contexte, la classe « écran tactique » permet de

sélectionner une étiquette représentant la victime ou l'objet trouvé et de la positionner sur la carte en fonction des coordonnées du curseur de la souris.

Au LoA autonome, lorsque l'opérateur humain assigne un nouvel objectif au robot en cliquant sur la carte à l'aide du bouton gauche de la souris, l'écran tactique récupère la position du curseur de la souris et la fournit à la classe « robot ».

Compte tenu des éventuels écarts dans le positionnement des robots souvent liés aux imprécisions des capteurs et des calculs, une fenêtre de recalage est ajoutée à la classe « écran tactique » (cf. Figure 4-13).

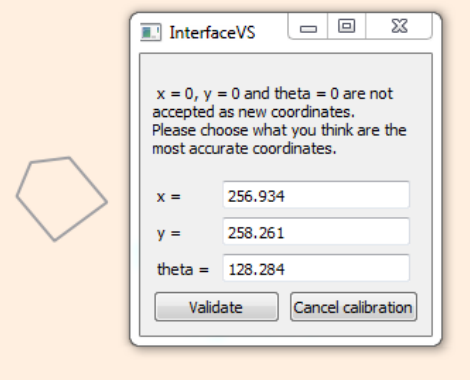


Figure 4-13 Fenêtre de recalage

La fenêtre de recalage donne la possibilité à l'opérateur humain de corriger la position et l'orientation du robot sélectionné, en récupérant les coordonnées du curseur sur la carte et le type du clic réalisé avec la souris : les coordonnées du curseur obtenues à partir d'un clic gauche permettent de mettre à jour la position, celles d'un clic droit de calculer et mettre à jour l'orientation. Pendant le recalage, la classe « écran tactique » affiche un symbole provisoire de couleur grise qui se déplace en fonction de la position et l'orientation fournies par la classe « recalage » (cf. Figure 4-13).

La classe « XBee » joue l'intermédiaire entre l'opérateur humain et les robots. Elle permet de transmettre les informations reçues du niveau opérationnel à la classe « robot » et à l'inverse d'envoyer les commandes de la classe « robot » au niveau opérationnel.

La classe « robot » comprend principalement les actions permises sur les robots et les attributs, exploités par les autres classes.

4.2.1.4 Communications

Deux types de communication sans-fil ont été nécessaires : la communication avec XBee et la communication avec Wi-Fi. La Figure 4-14 illustre la communication entre les différentes

composantes logicielles et matérielles du système homme-robots créé.

Le réseau Wi-Fi permet d'assurer la communication du flux vidéo de la caméra du smartphone monté sur le robot sur l'ETC et ce via le logiciel applicatif IP Webcam (application mobile téléchargée sur le smartphone et créant une adresse IP).

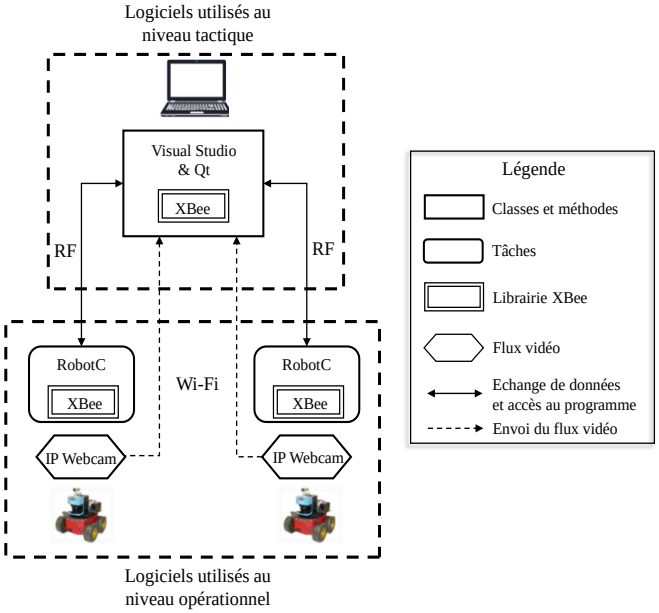


Figure 4-14 Communication entre les différentes composantes materielles et logicielles du système homme-robots

Pour communiquer avec l'ordinateur, les robots NXT utilisent le protocole de communication par Bluetooth intégré dans leur système. Néanmoins, compte tenu des limites de celui-ci, notamment en terme de portée (quelques dizaines de mètres), une communication sans fil XBee a été adoptée. Celle-ci utilise les protocoles IEEE 802.15.4 et Zigbee.

Le protocole de communication IEEE 802.15.4 permet d'établir la communication entre les modules XBee à basse consommation et le protocole Zigbee de créer l'architecture du réseau et de configurer d'autres paramètres. Cette communication est caractérisée principalement par une portée allant jusqu'à 100 m, une bande de fréquence de 2,4 GHz et une puissance d'émission de 1 mW. Afin d'aboutir à une communication fonctionnelle entre les différents modules XBee du système, il est nécessaire de procéder à la configuration de chaque module et à la création de la hiérarchie du réseau définie par ces modules. Les détails de cette configuration sont donnés en Annexe C.

Des programmes d'échanges d'informations sont réalisés sous Visual Studio C++ pour l'ETC et sous RobotC pour les robots. Depuis le poste de contrôle/commande, l'opérateur humain échange de nombreuses et différentes informations avec les robots. Compte tenu du

nombre conséquent d'échanges d'informations, il est important que le traitement des données soit réalisé dans un temps minimum afin de réduire l'effet de latence au cours du processus. La vitesse de transmission des données dépend des caractéristiques physiques des modules XBee utilisés, on ne peut donc pas agir dessus.

Une optimisation dans le transfert de données est donc réalisée en réduisant la taille et le nombre de paquets transmis. Un exemple de programme de réception de données envoyées par le robot à l'opérateur humain est donné sur la Figure 4-15. La communication de ces informations illustre le SC des robots.

```
PosX = (dataPacket->data[7] << 2) | (dataPacket->data[8] >> 6);
PosY = ((dataPacket->data[8] & 63) << 3) | (dataPacket->data[9] >> 5);
Psi = (((dataPacket->data[9] & 31) << 5) | (dataPacket->data[10] >> 3)) - 360;
Etat = (dataPacket->data[11] >> 6);
Obstacle = (dataPacket->data[11] & 63) >> 4;
ObstacleOrient = (dataPacket->data[11] & 15) >> 2;
F_Robot(NumRobot, PosX, PosY, Psi, Etat, Obstacle, ObstacleOrient);
```

Figure 4-15 Réception des données par l'ordinateur (sous visual c++) en fonction de l'adresse source (NumRobot). Les données sont récupérées à partir du 7ème octet (data[7]). Les octets précédents sont réservés pour l'entête (informations supplémentaires ajoutées au message)

4.3 Méthode d'évaluation

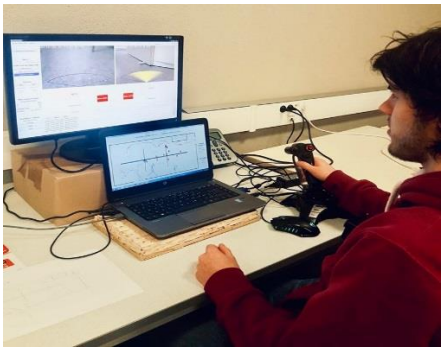
Cette section a pour objectif de présenter la méthode d'évaluation des LoA du système homme-robots définis sur les principes de la coopération entre l'opérateur humain et les robots et implémentés dans la section précédente. Au cours de cette évaluation, des opérateurs humains volontaires sont amenés à coopérer et interagir avec deux robots mobiles se trouvant dans un milieu hostile afin de réaliser une mission de sauvetage. L'expérimentation vise principalement à répondre aux questions de recherche posées par cette thèse, relatives aux choix et à l'adaptation des LoA du système homme-robots, et leur influence sur la qualité de la coopération entre l'humain et les robots.

4.3.1 Mission

Une expérimentation, inspirée d'une gestion de crise impliquant les pompiers, consiste en une mission de sauvetage et a pour objectif d'explorer six secteurs d'un bâtiment présentant un risque d'explosion, afin d'identifier et de localiser les dangers et les victimes. Une salle du LAMIH a été aménagée et organisée en six secteurs (cf. Figure 4-16(c)) contenant des figurines

Playmobil[6] représentant des victimes et des pancartes de danger (cf. Figure 4-16(b)).

Une autre salle est dédiée au poste de commandement (cf. Figure 4-16(a)), place de l'opérateur humain, de telle sorte qu'il ne perçoit l'environnement opérationnel que par le biais des robots. Deux robots sont équipés des trois LoA décrits dans la section 4.2.1.2. Au niveau opérationnel, chaque robot doit explorer trois secteurs différents.



(a) Poste de commandement



(b) Victimes et dangers



(c) Les 6 secteurs du bâtiment dangereux

Figure 4-16 Environnement expérimental

Au niveau tactique (poste de commandement), si l'opérateur humain détecte une victime ou un danger, il doit mettre à jour le plan de mission et affecter le robot vers un nouvel objectif (mise à jour de la trajectoire du robot). En fonction de la situation et de l'état du robot, l'opérateur humain peut adapter le LoA en choisissant un des trois niveaux : manuel, semi-autonome ou autonome présentés précédemment. Par exemple, si le robot rencontre des problèmes pour contourner un obstacle en LoA semi-autonome, l'opérateur humain peut décider de prendre le contrôle en choisissant le LoA manuel.

L'opérateur humain est amené à positionner sur le plan de mission (cf. Figure 4-12) l'icône correspondant à chaque objet trouvé (victime ou danger). Le participant a pour consigne

[6] Playmobil est une marque de jouets allemande créée en 1974 par Hans Beck et Horst Brandstätter.

d'aller vite comme pour une vraie crise et d'essayer d'utiliser les deux robots en même temps.

Une limite de temps de 6 minutes a été fixée pour explorer chaque secteur. Si cette limite est dépassée pour un secteur, on demande au participant de passer au suivant. Le participant doit atteindre le prochain secteur de chaque robot simultanément, ceci permet d'explorer deux secteurs à la fois et d'éviter qu'un robot prenne beaucoup d'avance sur l'autre. Les six secteurs doivent être explorés pour terminer la mission.

4.3.2 Participants

Vingt opérateurs humains ont été pressentis pour participer aux expérimentations. Les données de deux participants n'ont pas été utilisées pour l'analyse à cause de certains problèmes techniques survenus lors des tests. Les 18 participants retenus comprenaient 4 femmes et 14 hommes âgés entre 19 et 30 ans. 16 participants ont au moins un niveau de première année d'école d'ingénieur. 11 participants s'adonnent aux jeux vidéo plusieurs fois par semaine. Seuls 7 d'entre eux ont déjà contrôlé des robots ou des véhicules télécommandés.

4.3.3 Protocole

Après avoir reçu chaque participant dans la salle du poste de commandement, l'expérimentateur présente la plateforme expérimentale, les robots et les interfaces de contrôle et tactique (ETC) et les expérimentations.

Suite à cette présentation, le participant suit une séance d'entraînement. Cette séance permet à chacun de se familiariser à l'utilisation des LoA et au contrôle des robots via l'interface de contrôle et celle de supervision (tactique) sur un scénario spécifique. La séance d'entrainement a duré 40 minutes avec la présence d'un expérimentateur pour répondre à toute question du participant. Après la séance d'entraînement le participant est convoqué la semaine suivante pour le test.

Avant de commencer le test, le participant signe un formulaire de consentement et complète un questionnaire dont les questions portent sur ses caractéristiques personnelles pouvant affecter ses performances. Ensuite, la mission est expliquée, aussi qu'un rappel sur l'expérimentation. Le participant suit une courte séance d'entraînement (5min.) pour lui rappeler les différentes fonctionnalités des interfaces, suivie d'une pause de 5 minutes où il peut poser toute question sur le déroulement de la mission. Puis, il commence l'exécution de la mission qui lui est affectée. Deux conditions expérimentales sont définies, et une condition par groupe de 9 participants. Dans les deux conditions, un LoA est proposé en fonction de la

complexité de l'environnement dans chaque secteur. Il est suggéré que selon la complexité de l'environnement du robot, il serait important d'adapter le LoA du système homme-robots. La complexité de l'environnement est relative à la densité des obstacles dans l'environnement et donc à la tâche d'évitement d'obstacles (Olsen & Goodrich, 2003).

Dans l'une des conditions, le choix des LoA proposé est justifié selon le degré de la complexité de l'environnement dans chaque secteur : la visibilité, la densité des obstacles, le nombre de victimes estimé et des dangers connus affichés sur le plan de mission. Ces informations peuvent en effet être fournies par les documents élaborés par les SDIS sur les ETARE[7] (Direction de la Sécurité Civile et de la Gestion des Risques, 2017). Dans la suite du texte, cette condition expérimentale est associée à l'abréviation *WithInfo* (avec informations). Dans l'autre condition, le choix des LoA n'est pas justifié. Cette condition est associée à l'abréviation *WithoutInfo* (sans informations). Les interfaces tactiques utilisées dans les deux conditions expérimentales sont données dans l'Annexe D. À la fin du test, le participant remplit d'autres questionnaires relatifs à son ressenti durant l'expérimentation.

4.3.4 Mesures

La coopération homme-robots et l'adaptation des LoA sont évalués à partir des mesures objectives et subjectives collectées à chaque test expérimental.

4.3.4.1 Mesures objectives

Dans un premier temps, la performance dans la mission est calculée à partir de la moyenne de deux indicateurs objectifs, à savoir, le temps de l'accomplissement de la mission (Score_Temps) et le nombre de victimes et dangers identifiés (Score_Objets) (cf. équations (4.3) et (4.4)).

$$Performance_Mission = \frac{(Score_Temps + Score_Objets)}{2} \tag{4.3}$$

$$\begin{cases} Score_Temps = 1 - \left(\dfrac{Temps_Mission}{Temps_Max} \right) \quad , \quad Temps_Max = 36\,\text{min}\ (6\,\text{min/sec}\,teur) \\ Score_Objets = \dfrac{Objets_Localisés}{Objets_Existants} \end{cases} \tag{4.4}$$

Le temps de l'accomplissement de la mission par chaque participant a été mesuré à l'aide d'un chronomètre en seconde à partir du moment où le participant commence la mission

[7] Établissements répertoriés qui font l'objet de dispositions opérationnelles spécifiques

jusqu'au moment où chaque robot a parcouru et exploré les trois secteurs alloués.

Dans un second temps, un *temps de négligence* est calculé. Il représente la durée pendant laquelle un robot est négligé par l'opérateur humain (Olsen & Goodrich, 2003). Le temps de négligence est utilisé comme une métrique pour évaluer la capacité du participant à utiliser et interagir avec les deux robots simultanément. Le temps de négligence est calculé lorsque le robot non sélectionné par le participant est arrêté pendant une période de temps donnée (seuil = 30 sec). Un robot est toujours sélectionné par le participant.

Dans un troisième temps, l'adaptation des LoA est évaluée par le nombre de fois que les participants ont respecté le LoA proposé au début de chaque secteur.

4.3.4.2 Mesures subjectives

Une auto-évaluation de la *charge de travail* basée sur le questionnaire NASA-TLX est réalisée par les participants en fin de mission (Hart, 2006). Ce questionnaire est suivi de l'évaluation de la *conscience de la situation*. La conscience de la situation traitée est liée à la capacité des participants à percevoir (comparable au niveau SA1 du modèle de Endsley (Endsley, 1995)). Les participants doivent se remémorer l'ensemble des obstacles trouvé dans l'environnement opérationnel et les situer sur une feuille représentant le plan de la mission. Un pourcentage est calculé en fonction du nombre trouvé et du nombre effectif. Puis les participants prennent part à un débriefing et répondent à des questionnaires relatifs à leur propre expérience au cours de la mission. Les données sont ensuite analysées. Une analyse de l'effet des *variables indépendantes* (les conditions expérimentales, la fréquence de pratique des jeux vidéo[8] et l'interaction entre les deux) sur les *variables dépendantes* (la performance dans la mission, le temps de négligence, la charge de travail, la conscience de la situation, le respect des LoA proposés et les réponses aux questionnaires) est réalisée à l'aide d'une analyse de la variance « ANOVA » et des corrélations (entre des variables quantitatives)[9].

Afin d'évaluer la significativité statistique des résultats, deux seuils sont fixés : un seuil de significativité statistique de 95% et un seuil de tendance à la significativité de 92%. Dans la section suivante nous présentons et discutons les résultats obtenus.

[8] Compte tenu du côté ludique de la mission qui ressemble aux jeux vidéo, on s'est interssé à étudier l'effet de la pratique des jeux vidéo sur les performances des participants

[9] Ces tests statistiques ont été réalisés à l'aide du logiciel d'analyse statistique « STATISTICA »

4.4 Résultats

Nous présentons ici les résultats de l'analyse des données recueillies. Les variables indépendantes utilisées sont : la condition expérimentale (WithInfo et WithoutInfo), la fréquence à laquelle le participant joue à des jeux vidéo et l'intersection entre les deux. Les résultats obtenus sont organisés suivants deux sections : résultats basés sur les mesures objectives et résultats basés sur les mesures subjectives.

4.4.1 Résultats basés sur les mesures objectives

Les résultats basés sur les mesures objectives comprennent les variables dépendantes suivantes : la performance dans la mission, le temps de négligence et le respect des LoA proposés.

Performance dans la mission

Effet des « conditions expérimentales » : la Figure 4-17 montre l'effet des conditions expérimentales sur la performance dans la mission. Les moyennes ainsi que les écarts types sont indiqués pour les deux conditions.

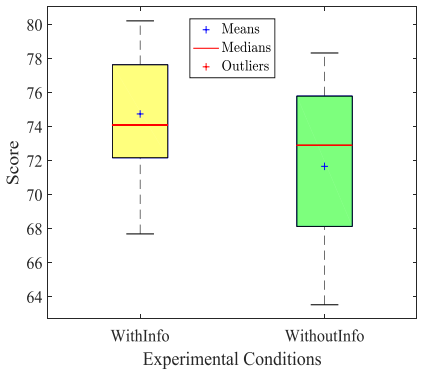


Figure 4-17 Performance dans la mission en fonction des conditions expérimentales

On a remarqué que la moyenne de la performance est plus élevée dans la condition WithInfo que dans la condition WithoutInfo. Néanmoins, le test ANOVA a montré que cette différence n'est pas statistiquement significative ($F(1,16) = 2,1153, p = 0,16517$).

Les scores moyens des objets trouvés dans les conditions expérimentales ont été comparés. Le score a été significativement plus élevé dans la condition WithInfo que dans la condition WithoutInfo ($F(1,16) = 6,4000, p = 0,02229$). Les temps passés pour l'accomplissement de la mission ont été également comparés. Il existe une légère différence entre les deux conditions (la moyenne a été plus élevée dans la condition WithInfo) mais avec une différence non significative. Suite à ces deux résultats et puisque la performance dans la

mission est calculée à partir du temps de l'accomplissement de la mission et du nombre d'objets trouvés (cf. section 4.3.4), on peut noter que la différence de performance dans la mission est principalement due à la différence dans le score relatif au nombre d'objets trouvés par les participants.

En outre, les analyses répétées de l'ANOVA ont montré une tendance à la différence significative du score des objets trouvés et du temps passé dans l'exécution de la mission entre les conditions expérimentales ($F(2,15)=3,0026, p=0,08003$). Cependant, on pourrait supposer que le temps nécessaire pour accomplir la mission est inversement proportionnel au nombre de victimes et dangers trouvés. En d'autres termes, plus le participant est rapide dans l'exécution de la mission, moins il est capable de localiser tous les objets à rechercher.

Effet de « la fréquence de pratique des jeux vidéo » : nous avons remarqué une différence de performance entre les participants suivant la fréquence à laquelle ils s'adonnent aux jeux vidéo par semaine. Toutefois, le test ANOVA a montré que cette différence n'atteignait pas le seuil de significativité statistique ($F(2,12)=1,7289, p=0,21102$).

Effet de l'interaction « conditions expérimentales x fréquence de jeu » : l'effet de l'interaction entre la condition expérimentale et la fréquence à laquelle les participants s'adonnent aux jeux vidéo sur la performance dans la mission est jugée marginalement significative ($F(2,12)=3,1946, p=0,07721$). Contrairement aux joueurs non assidus, les joueurs assidus ont réalisé une meilleure performance dans la condition WithInfo.

Temps de négligence

Effet des « conditions expérimentales » : le temps de négligence des robots par les participants dans chaque condition expérimentale est présenté sur la Figure 4-18.

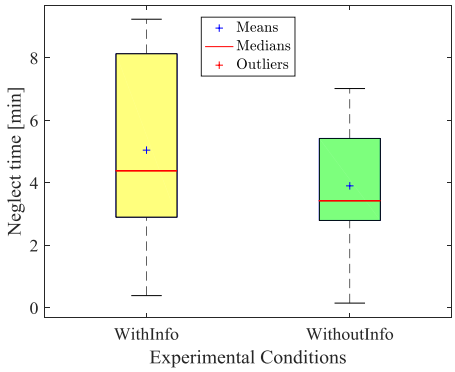


Figure 4-18 Temps de négligence en fonction des conditions expérimentales

Nous avons remarqué que la moyenne du temps de négligence dans la condition WithInfo

est supérieure à celle dans la condition WithoutInfo. Le test ANOVA a conclu que cette différence n'est pas statiquement significative ($F(1,16)=0,83682, p=0,37389$). En outre, nous avons constaté une relation forte entre le temps de l'accomplissement de la mission et le temps de négligence (corrélation significative de $0,86$). Les participants prennent plus de temps pour accomplir la mission lorsqu'ils négligent souvent un des robots et, quand ils ont des difficultés à utiliser et interagir avec les deux simultanément.

Effet de « la fréquence de pratique des jeux vidéo » : le test ANOVA a montré un effet significatif de la fréquence de jeu aux jeux vidéo sur le temps de négligence des robots ($F(2,15)=4,9813, p=0,02193$). Les participants qui jouent occasionnellement aux jeux vidéo ont marqué un temps de négligence nettement plus élevé que ceux qui y jouent souvent ou très souvent.

Effet de l'interaction « conditions expérimentales x fréquence de jeu » : l'interaction entre les conditions expérimentales et la fréquence de jeux vidéo a révélé une tendance à la significativité statistique ($F(2,12)=3,1994, p=0,07697$). Les participants qui jouent souvent et très souvent aux jeux vidéo ont réalisé un temps de négligence moins élevé dans la condition WithInfo que dans la condition WithoutInfo. À l'opposé, les participants qui consacrent moins de temps aux jeux vidéo, réalisent un temps de négligence plus élevé.

Respect des LoA proposés

Effet des « conditions expérimentales » : la Figure 4-19 montre l'effet des conditions expérimentales sur le respect des LoA proposés. Une différence entre les conditions expérimentales est relevée.

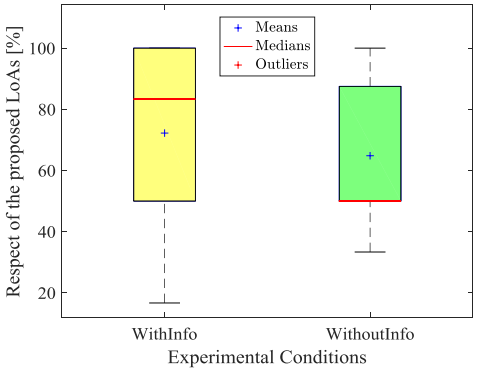


Figure 4-19 Respect des LoA proposés en fonction des conditions expérimentales

On note que les LoA proposés sont plus respectés par les participants dans la condition WithInfo que dans la condition WithoutInfo. Une hypothèse serait que les participants dans la

condition WithInfo adhèrent davantage aux LoA proposés, grâce aux informations sur l'environnement opérationnel affichées sur l'interface tactique. Autrement dit, le LoA proposé à chaque secteur a été justifié dans la condition WithInfo par les informations fournies sur la complexité de la mission et de l'environnement. En revanche, le test ANOVA indique une différence non statistiquement significative ($F(1,16)=0,34783, p=0,56358$).

Les conditions expérimentales n'ont donc pas d'effet significatif sur le respect des LoA proposés. Notre intérêt s'est ensuite porté sur l'étude de l'impact des conditions expérimentales et sa significativité sur le respect d'un LoA en particulier. Le LoA le plus respecté dans les deux conditions expérimentales est également identifié. Le test ANOVA a souligné un effet significatif sur le respect du LoA autonome (autonomous) ($F(1,16)=4,9655, p=0,04055$). Le LoA manuel (remote control) a été le LoA le plus respecté par les participants (cf. Figure 4-20).

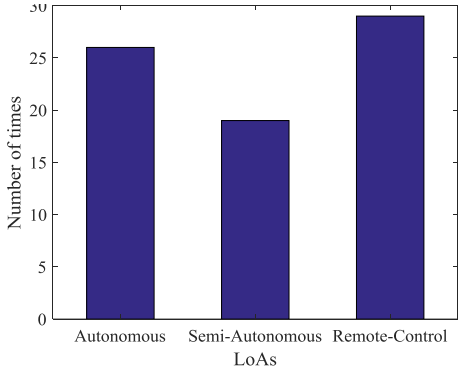


Figure 4-20 Respect des LoA proposés

Effet de « la fréquence de pratique des jeux vidéo » : l'ANOVA réalisée sur l'effet de la fréquence à laquelle les participants s'adonnent aux jeux vidéo sur le respect des LoA proposés a révélé un résultat à tendance statistiquement significative ($F(1,16)=3,1009, p=0,07462$). Les joueurs non assidus ont tendance à mieux respecter les LoA proposés.

Effet de l'interaction « conditions expérimentales x fréquence de jeu » : l'interaction entre l'effet des conditions expérimentales et la fréquence de pratique des jeux vidéo sur le respect des LoA proposés n'a souligné aucune différence statiquement significative ($F(2,12)=0,46932, p=0,63644$).

4.4.2 Résultats basés sur les mesures subjectives

Les résultats basés sur les mesures subjectives sont composés des variables dépendantes suivantes : la charge de travail, la conscience de la situation et les réponses aux questionnaires.

Charge de travail

L'évaluation subjective de la charge de travail obtenue par le questionnaire NASA-TLX est composée de deux parties. La première représente le score pondéré de chaque descripteur (exigence mentale, exigence physique, exigence temporelle, performance, effort et frustration). L'évaluation de chaque descripteur sur une échelle de 1 à 10 et le poids attribué à chacun par les participants sont utilisés. La deuxième partie représente la charge de travail totale calculée à partir de la somme des descripteurs pondérés. Ces résultats sont donnés pour chaque condition expérimentale et représentés sur les Figure 4-21 et Figure 4-22 respectivement.

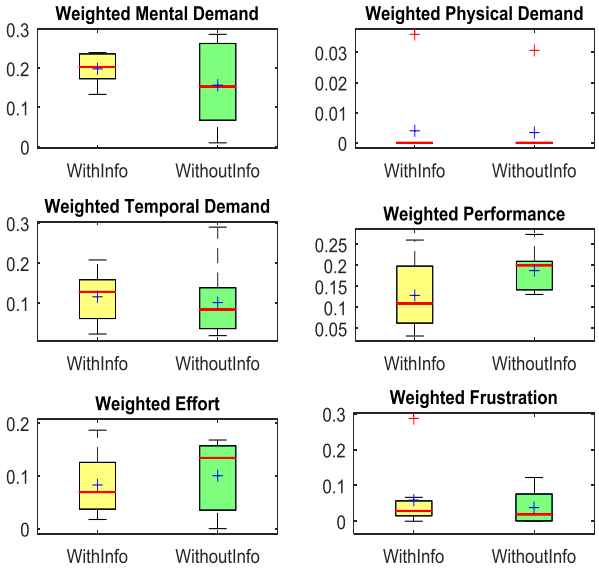


Figure 4-21 Descripteurs de la charge de travail pondérées en fonction des conditions exoérimentales

Effet des « conditions expérimentales » : les résultats ont montré des différences entre exigence mentale, effort et performance. Néanmoins, le test ANOVA réalisé pour chacun des descripteurs n'a indiqué aucune différence significative, excepté pour le descripteur « performance » (le résultat tend vers la significativité ($F(1,16)=3,6992, p=0,07242$)).

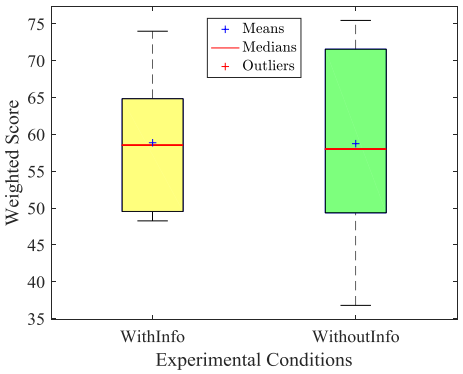


Figure 4-22 Charge de travail pondérée en fonction des conditions expérimentales

En outre, nous avons constaté une corrélation significative entre la charge de travail pondérée et l'exigence mentale pondérée ($0,64$), ainsi qu'entre la charge de travail pondérée et l'effort pondéré ($0,79$). Ce résultat signifie qu'au cours de la mission, la charge de travail est principalement due à l'effort et à l'exigence mentale de la mission dans les deux conditions expérimentales.

Effet de « la fréquence de pratique des jeux vidéo » : l'effet de la fréquence de jeu aux jeux vidéo sur la charge de travail est jugé significatif ($F(2,15)=5,9265, p=0,01268$). Dans ce sens, les participants, qui ont indiqué jouer occasionnellement aux jeux vidéo, ont ressenti une charge de travail plus importante que ceux qui y jouent souvent ou très souvent.

Effet de l'interaction « conditions expérimentales x fréquence de jeu » : l'interaction entre les conditions expérimentales et la fréquence de jeu aux jeux vidéo a indiqué un effet non significatif sur la charge de travail ($F(2,15)=0,42612, p=0,66255$).

Conscience de la situation

La conscience de la situation traitée est liée à la capacité des participants à percevoir. Une fois la mission accomplie, le participant est appelé à se rappeler de l'environnement opérationnel en reproduisant les obstacles dont il se souvient sur une feuille de papier présentant le plan de la mission. Ensuite, un score en pourcentage des obstacles correctement identifiés a été calculé.

Effet des « conditions expérimentales » : les résultats ont montré un effet différent des conditions expérimentales sur la conscience de la situation (cf. Figure 4-23). Les participants dans la condition WithInfo ont fait preuve d'une meilleure conscience de la situation que les participants dans la condition WithoutInfo. Le test statistique ANOVA a donné un résultat significatif ($F\ (1,16)=4,7904,\ p=0,04379$).

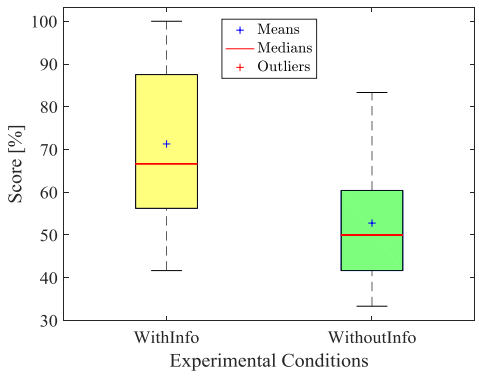


Figure 4-23 Conscience de la situation en fonction des conditions expérimentales

Effet de « la fréquence de pratique des jeux vidéo » : la fréquence de jeu n'a révélé aucun effet significatif sur la conscience de la situation des participants ($F(2,15)=0,35094, p=0,70865$).

Effet de l'interaction « conditions expérimentales x fréquence de jeu » : l'interaction entre la condition expérimentale et la fréquence de jouer aux jeux vidéo n'a aussi montré aucun effet significatif sur la conscience de la situation ($F(2,15)=0,3850, p=0,69934$).

Questionnaires

Dans les questionnaires, il a été demandé aux participants de répondre à certaines questions relatives à leur propre expérience au cours de la mission. À partir du test ANOVA à mesures répétées, on a sélectionné les questions qui ont eu des effets significatifs sur les variables dépendantes (les performances des participants et le respect des LoA proposés). Deux questions ont été sélectionnées :

• Q1: Les obstacles rencontrés dans l'environnement opérationnel ont-ils été difficiles à éviter?

(Non, Moyen, Oui)

• Q2: Pensez-vous que les LoA proposés ont amélioré vos performances?

(Non, Moyen, Oui)

Deux catégories de réponses à la question Q1 ont été obtenues : des participants qui ont répondu « Non » et d'autres « Moyen » (cf. Figure 4-24).

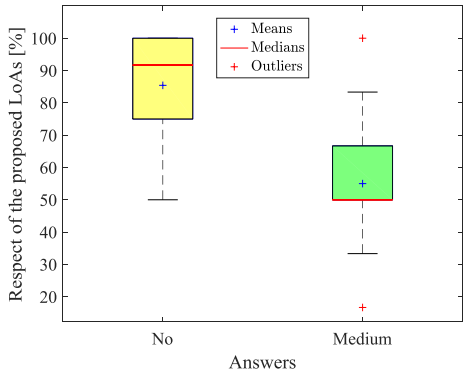


Figure 4-24 Respect des LoA proposés en fonction des réponses à la question Q1

Le test ANOVA a révélé une différence significative ($F(1,16)=8,7801 p=0,00916$). Par conséquent, plus le participant a respecté les LoA proposés, moins il a pensé que les obstacles dans l'environnement étaient difficiles à éviter.

Suite à la question Q2, 5 participants ont répondu « non » et 13 ont répondu « oui » (cf. Figure 4-25). D'une part, nous avons remarqué que les participants ayant répondu « oui » ont davantage respecté les LoA proposés que ceux qui ont répondu « non ». Le test ANOVA donne un résultat statistiquement significatif ($F(1,16)=6,3733 p=0,02253$). D'autre part, nous avons remarqué une relation entre les réponses des participants à la question Q2, le respect des LoA et leur performance dans la mission. En d'autres termes, les opérateurs qui pensent que les LoA proposés ont amélioré leurs performances sont ceux qui les ont le plus respectés et qui ont réalisé de meilleures performances. Une ANOVA à mesures répétées a dénoté un résultat marginalement significatif ($F(2,15)=3,3155 p=0,06421$).

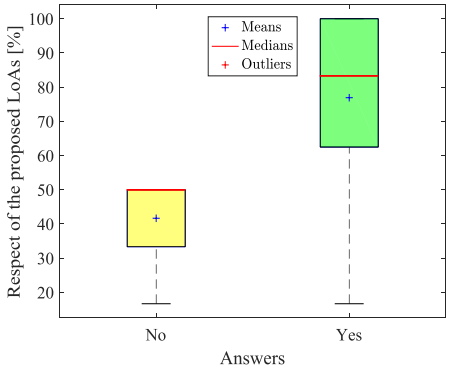


Figure 4-25 Respect des LoA proposés en fonction des réponses à la qustion Q2

En outre, il s'est avéré qu'il existe une relation entre les réponses des participants à la question Q2, le respect des LoA et la charge de travail. Les participants qui pensent que les LoA proposés ont permis d'améliorer leurs performances sont ceux qui les ont le plus respectés et ceux qui ont été moins surchargés. Le test ANOVA donne un résultat significatif ($F(2,15)=4,1669 p=0,03637$).

Un deuxième questionnaire a été réalisé à partir du modèle de coopération homme-robot (cf. Annexe E). Par ce questionnaire, les participants ont évalué de manière subjective la perception des capacités des robots en terme du SF et du SC, ainsi que de leur propre SF et SC. Les réponses ont été mesurées sur une échelle linéaire allant de 0% (pas du tout) à 100% (tout à fait).

Pour en savoir plus sur les expériences des participants durant les expérimentations, on a évalué l'influence de leurs SF et SC sur leurs performances. On a calculé les corrélations entre les performances des participants et leurs réponses sur le questionnaire réalisé à partir du modèle de coopération. Ensuite, on a représenté les résultats significatifs dans le Tableau 4.

Tableau 4 Corrélations significatives entre les réponses des participants concernant leurs SF et SC et leurs performances (Temps de négligence (NT), Temps de l'exécution (T) et conscience de la situation (SA))

Questions relatives aux SF et SC des participants	Performances corrélées
Pensez-vous avoir mis à jour le plan au bon moment ?	*NT* (–0.51)
Pensez-vous avoir souvent fait le bon choix du LoA ?	*T* (–0.63) *NT* (–0.56)
Pensez-vous avoir souvent changé le LoA au bon moment ?	*SA* (–0.59)
Avez-vous réussi à détecter les interférences (conflits avec la décision/action des robots) ?	*T* (–0.53) *SA* (–0.49)

Les résultats ont montré que le SF des participants du niveau tactique concernant la mise à jour du plan de mission et leurs SC portés sur le choix du LoA, présentent des corrélations négatives avec le temps de négligence (NT). En d'autres termes, plus les participants ont réussi à utiliser les deux robots simultanément (le temps de négligence plus faible), plus ils pensent avoir mis à jour le plan de mission en modifiant les trajectoires des robots au bon moment et avoir souvent fait le bon choix du LoA. De même, moins les participants ont pris du temps pour l'accomplissement de la mission, plus ils pensent avoir souvent fait le bon choix du LoA (corrélation négative entre le fait d'avoir souvent fait le bon choix du LoA et le temps de l'accomplissement de la mission (T)).

Les résultats ont aussi indiqué que le SC des participants en termes de détection d'interférences survenues lors de la mission (principalement liées aux conflits avec la décision/action des robots) et le changement de LoA au bon moment, présentent des corrélations négatives avec la conscience de la situation (SA). Plus les participants ont été conscients de la situation, moins ils pensent avoir détecté les interférences et adapté le LoA au bon moment. Une corrélation négative a été également identifiée entre la détection d'interférences et le temps mis pour l'accomplissement de la mission (T). Plus le participant a mis du temps pour accomplir la mission, moins il pense avoir bien détecter les interférences.

Débriefing

Une séance de débriefing a été réalisée avec les participants afin d'obtenir plus de détails sur leur ressenti durant la mission, ou d'autres informations utiles pour répondre aux questions de recherche posées par cette thèse, et notamment sur l'adaptation des LoA. Dans les deux conditions expérimentales les participants ont déclaré avoir facilement fait le choix des LoA au

cours de la mission. En revanche, la plupart des participants ont annoncé avoir souvent voulu téléopérer les robots (utilisation du LoA manuel), en raison de l'acceptabilité et de la confiance qu'ils ont placées dans l'autonomie des robots.

La majorité des participants a déclaré avoir choisi le LoA autonome ou semi-autonome dans les situations où aucune victime ni danger n'ont été détectés ou dans les situations où le robot doit se déplacer en ligne droite (absence d'obstacles). Dans le cas contraire, les participants ont préféré téléopérer le robot.

En général, les participants ayant respecté les LoA proposés, ont choisi le LoA proposé au début de chaque secteur, ensuite ils l'ont adapté en fonction des éventuelles interférences survenues, par exemple, lorsqu'un robot a rencontré des difficultés pour éviter des obstacles. En outre, la majorité des participants a signalé la difficulté à gérer les deux robots en même temps.

4.4.3 Discussion

L'analyse des données de la présente étude révèle l'importance de la conception d'un système homme-robots. Les résultats ont montré qu'afficher des informations concernant la complexité de l'environnement opérationnel sur l'interface tactique, a des effets significatifs sur la performance de l'opérateur humain en terme d'objets localisés dans cet environnement. De plus, ces informations permettent d'améliorer significativement la conscience de la situation des opérateurs humains. Ceci est justifié par le fait que lorsqu'il leur a été demandé lors de l'évaluation de la conscience de la situation de repositionner les obstacles dont ils se souvenaient dans l'environnement opérationnel, ils se rappelaient d'abord des trajectoires suivies par les robots pour atteindre les objets trouvés. Par conséquent, l'opérateur humain a réussi à créer une image plus complète de l'environnement, autrement dit une meilleure conscience de la situation. Dans cette étude, la conscience de la situation a été évaluée à la fin de la mission à cause la complexité de cette dernière.

Les résultats de cette recherche ont révélé que les performances du système homme-robots dépendent aussi de la fréquence à laquelle les opérateurs humains s'adonnent aux jeux vidéo. Les joueurs assidus ont plus de facilité à interagir et coopérer avec les deux robots simultanément. Ce qui leur permet de réaliser plus rapidement la mission. Les informations fournies sur l'environnement peuvent ne pas être utilisées efficacement par les joueurs non assidus. Nous estimons que ce résultat est lié au fait que ces opérateurs prennent plus de temps à rechercher les objets en utilisant un robot au détriment du temps de négligence de l'autre

robot. À l'opposé, les joueurs assidus tendent à utiliser les informations fournies pour répartir plus efficacement leur attention sur les deux robots.

Concernant l'adaptation des LoA, les informations affichées sur l'interface tactique (nombre de victimes, nombre de dangers et densité des obstacles dans l'environnement opérationnel) ne semblent pas justifier les LoA proposés. En revanche, les résultats ont montré que celles-ci permettent de justifier le LoA autonome. Grâce aux informations fournies, les opérateurs humains ont été informés de la faible complexité de l'environnement pour lequel le LoA a été proposé. C'est pourquoi on pense que les opérateurs étaient plus confiants à l'idée d'utiliser le LoA autonome. Selon certains participants, ce résultat pourrait être lié à la confiance qu'ils ont placé dans l'autonomie des robots (Shahrdar, Menezes, & Nojoumian, 2019), ou plus encore à leur acceptabilité (Beer et *al*., 2011). La confiance et l'acceptabilité sont considérées comme deux éléments importants dans la relation homme-machine (cf. chapitre 1). Dans ce sens, les résultats ont aussi mis en avant la préférence des opérateurs humains pour le contrôle manuel des robots. En effet, les résultats ont montré que les participants préféraient contrôler les robots manuellement, plutôt que de les superviser pendant le LoA autonome, ou plus encore de partager le contrôle avec eux en semi-autonome. Le LoA manuel a été aussi le niveau proposé le plus respecté.

Il a été remarqué que les joueurs assidus tendent à moins respecter les LoA proposés. Ceci peut être lié à la confiance en soi que ces opérateurs ont dans leur capacité à choisir le LoA ou dans leur capacité de contrôle manuel. En effet, l'opérateur humain peut avoir plus ou moins confiance en ses propres capacités à exécuter des tâches (Itoh & Pacaux-Lemoine, 2018). La charge de travail ressentie par les joueurs assidus est moins importante que celle des joueurs non assidus. On pense que ce résultat est lié à l'expérience des opérateurs dans ce genre de tâches. Ce résultat est soutenu par (Chen & Barnes, 2012) dans leur étude réalisée dans le cadre de la supervision de plusieurs robots dans un contexte multitâche du domaine militaire.

Les réponses aux questionnaires révèlent que le respect des LoA proposés permet d'adapter le LoA à la complexité de l'environnement. En effet, les opérateurs qui pensent que les obstacles de l'environnement sont difficiles à éviter, sont ceux qui ont moins respecté les LoA proposés. Dans ce sens, les critères sur lesquels est basé le choix des LoA proposés tiennent compte principalement de la densité des obstacles se trouvant dans l'environnement de chaque secteur. On estime que la densité des obstacles pourrait être toutefois susceptible de contribuer à la complexité de la sous-tâche de détection et d'évitement d'obstacles par les robots (Olsen & Goodrich, 2003). Par conséquent, l'opérateur qui a respecté les LoA proposés, a

probablement choisi le LoA qui correspondait le mieux au SF des robots à détecter et à éviter les obstacles dans chaque secteur. Le respect des LoA proposés peut aussi améliorer la performance dans la mission et réduire la charge de travail des opérateurs humains.

Finalement, les résultats ont montré que les SF et SC des opérateurs humains à réaliser certaines tâches sont en relation linéaire négative avec leur capacité à interagir avec deux robots simultanément (temps de négligence), le temps qu'ils ont pris pour l'accomplissement de la mission et leur conscience de la situation. En d'autres termes, plus les opérateurs humains ont eu de bonnes performances, plus ils pensent avoir eu de bons SF et SC.

Les résultats de cette étude peuvent dépendre de la sous-tâche de recalage du robot, mais malheureusement aucun indicateur n'a été pris en compte. De plus, nous avons remarqué durant les expérimentations, que suite aux comportements différents des opérateurs humains et au contexte dynamique de la mission, les interférences survenues lors des tests expérimentaux n'étaient pas les mêmes. Néanmoins, ceci a permis de relever l'influence du SC de l'opérateur humain sur ses performances.

Des opérateurs humains ayant plus ou moins l'habitude de jouer aux jeux vidéo ont participé à cette étude. Cette population présente peut-être des différences de compétences comparée à d'autres types de population.

4.4.4 Conclusions et perspectives

En définitive, des résultats de la présente recherche on peut tirer les conclusions suivantes :

- Les informations affichées sur l'interface tactique concernant la complexité de l'environnement améliorent la conscience de la situation des opérateurs humains. Celles-ci permettent d'améliorer la confiance et l'acceptabilité des opérateurs humains à choisir le LoA autonome.
- La fréquence des jeux vidéo pratiqués par les opérateurs humains réduit le temps de négligence des robots, c'est-à-dire, qu'elle augmente leur capacité à interagir et coopérer avec les deux robots simultanément. Elle leur permet aussi d'être plus rapides dans l'accomplissement de la mission et de moins ressentir la charge de travail.
- Le respect des LoA proposés permet au système homme-robots de mieux gérer la complexité de l'environnement. De plus, il améliore la performance dans la mission et réduit la charge de travail des opérateurs humains.

- Le temps de négligence des robots est en relation linéaire négative avec le SF de l'opérateur concernant la mise à jour du plan de mission au bon moment. Plus l'opérateur humain se sent expérimenté sur la réalisation de cette tâche, plus il a de facilité à utiliser et interagir avec les deux robots simultanément.
- Le SC de l'opérateur humain porté sur l'adaptation du LoA et la détection d'interférences est en relation linéaire négative avec le temps de négligence, le temps mis pour l'accomplissement de la mission et la conscience de la situation. Plus l'opérateur humain se sent à l'aise avec les robots, plus il est rapide en ayant plus de facilité à en utiliser les deux en même temps, mais moins il est conscient de la situation.

Des perspectives de recherche s'ouvrent à la suite de cette étude. D'abord il serait intéressant de concevoir un système d'assistance au niveau tactique dans le but d'améliorer la coopération entre l'humain et les robots en adaptant en temps réel les LoA. La charge de travail, la complexité de l'environnement et le temps de négligence sont des critères d'adaptabilité qui peuvent être utilisés. Le système d'assistance devrait aussi aider l'opérateur à partager son attention sur les robots. Ensuite, il serait important d'étudier davantage le système avec des opérateurs non joueurs, afin de relever d'autres critères d'adaptabilité. Enfin, l'acceptabilité reste un élément opportun à prendre en compte lors de la conception de tels systèmes. Celle-ci pourrait dépendre des caractéristiques personnelles des utilisateurs. Dans ce sens, les systèmes homme-robots devraient être conçus de façon à répondre au mieux aux attentes des futurs utilisateurs. De plus, des phases d'entraînement plus longues pourraient toujours améliorer les SF et SC des utilisateurs.

4.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté la mise en œuvre d'un système homme-robots. Son implémentation utilise les concepts fondamentaux de la coopération homme-machine. Le système comprend trois LoA adaptables définis suivant la méthode présentée dans le chapitre 3. Il est constitué d'un ensemble de matériels et logiciels répartis sur les différents niveaux d'abstraction de la réalisation d'une mission. Ce système est utilisé dans une étude expérimentale permettant d'évaluer la coopération homme-robots dans un scénario de gestion de crise via l'adaptation des LoA. Cette étude a montré l'influence des informations fournies aux opérateurs humains sur l'environnement opérationnel et la fréquence à laquelle ils jouent aux jeux vidéo. Elle a aussi révélé un manque d'acceptabilité et de confiance des opérateurs envers les robots.

5 IMPLEMENTATION ET EVALUATION DE LA COOPERATION HOMME-ROBOT DANS LE CADRE DU HANDICAP

5.1 Introduction

Ce chapitre a pour but de présenter deux études expérimentales réalisées afin d'évaluer la coopération homme-robot dans le cadre du handicap. À cet effet nous avons réalisé un système homme-robot de téléprésence dédié à des personnes à mobilité réduite. Afin d'en tester la faisabilité technique et de relever les principales améliorations à y apporter, deux études expérimentales ont été menées. Une étude préliminaire a eu pour principal objectif de montrer la faisabilité technique d'un nouveau concept de contrôle via une interface cerveau-machine. La seconde étude a été conduite afin d'évaluer la performance du système global et la qualité de la coopération entre l'humain et le robot sous différents LoA afin de répondre aux mieux aux besoins des utilisateurs.

Présentation du contexte

Selon l'organisation mondiale de la santé, le monde compte plus de 1 milliard de personnes en situation de handicap[10] (environ 15% de la population mondiale)[11]. Chaque année entre 250 et 500 milles personnes souffrent d'une tétraplégie[12]. Ces personnes vivent des difficultés fonctionnelles importantes au quotidien provoquant une fatigabilité accrue et sont exposées au risque de se détacher de la société. Pour pallier certains handicaps, la robotique mobile d'assistance et de service cherche à aider les personnes tétraplégiques en réduisant leur isolement et en gardant un lien social tout en regagnant en autonomie. La conception d'un système robotique de service doit tenir compte notamment de la déficience motrice de ces personnes.

Dans ce contexte, la présente recherche vise à proposer et évaluer un système de contrôle à distance d'un robot mobile. Ce type de système pourrait être utilisé par les personnes tétraplégiques dans leur vie quotidienne (cf. Figure 5-1**)**.

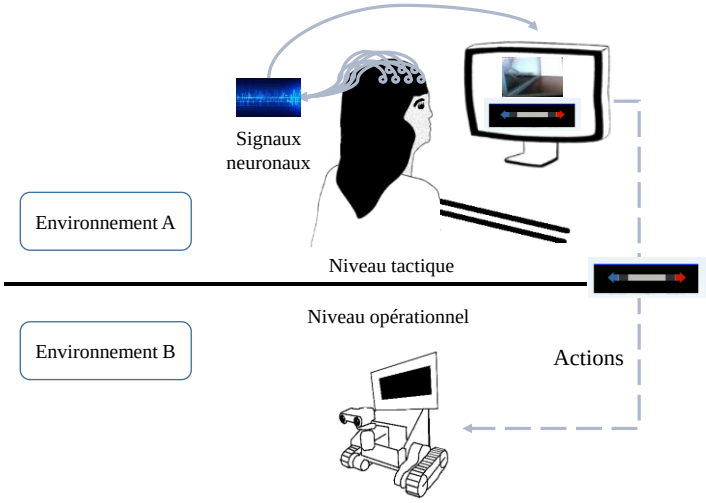


Figure 5-1 Système homme-robot basé sur le BCI

C'est un outil de téléprésence qui permet aux utilisateurs d'explorer des endroits différents de celui où ils sont, ou d'interagir avec des personnes se trouvant dans un autre environnement, sans avoir à se déplacer. Il utilise une interface neuronale directe, appelée interface cerveau-machine (abrégée BCI)[13] qui permet aux utilisateurs une interaction avec un robot de service uniquement en utilisant leurs « pensées » traduites par leur activité cérébrale.

[10] Est considérée comme personne handicapée toute personne souffrant d'une incapacité ou d'une limitation d'activité d'après l'*Enquête HID de l'INSEE de 2001.*
[11] https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/disability-and-health
[12] https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/spinal-cord-injury
[13] De l'anglais Brain-Computer-Interface

Ce type d'interfaces offre un moyen plus naturel de contrôle de robots. Dans cette optique, notre étude porte sur la coopération entre le robot et l'humain en utilisant le BCI selon différents LoA. Les activités réalisées par le système homme-robot sont représentées selon deux niveaux d'abstraction : tactique et opérationnel. Au niveau tactique l'opérateur utilise l'interface de contrôle composée du retour vidéo du robot et du BCI. Cette interface permet de mettre à jour et d'envoyer au robot certaines actions à réaliser en fonction de ses objectifs. Au niveau opérationnel, le robot met en œuvre ces actions.

Coopération homme-robot-BCI

La coopération au sein du système homme-robot-BCI a été mise en place à partir du modèle de coopération (cf. Figure 5-2). Cette recherche met en œuvre les deux niveaux de coopération, tactique et opérationnel.

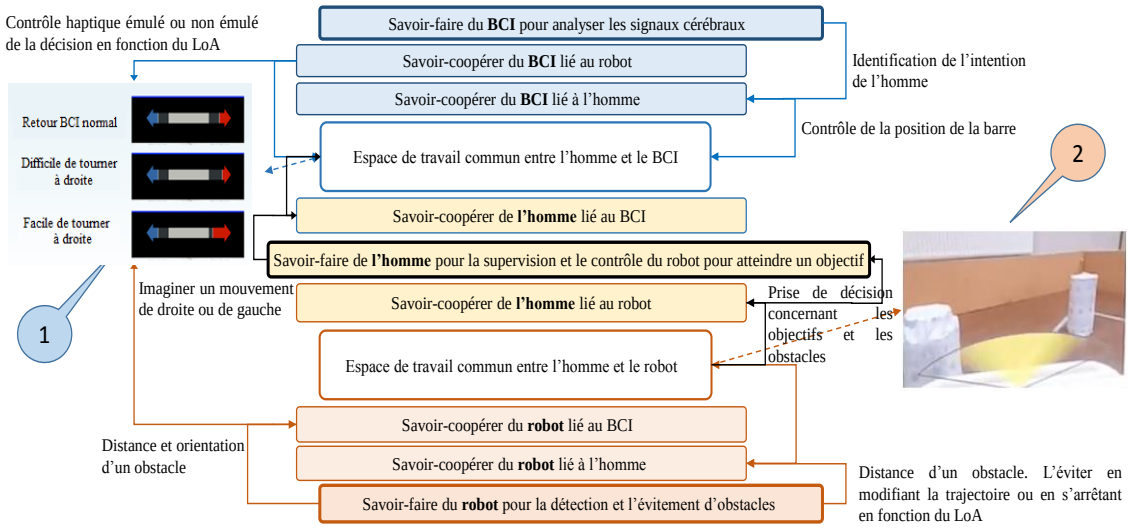


Figure 5-2 Modèle de coopération entre l'humain, le robot et le BCI en fonction de leur savoir-faire (SF) et savoir-coopérer (SC). Les agents utilisent des espaces de travail communs : humain et le BCI (1), humain et robot (2)

Le niveau tactique gère la mise à jour du plan de mission, c'est-à-dire la modification de la trajectoire pour atteindre la cible après l'évitement d'un obstacle inattendu. Dans ce cas de téléprésence, nous considérons que la cible n'impose pas la conception d'un plan précis, car il serait constamment modifié en fonction de nouvelles opportunités comme de nouvelles informations à rechercher ou d'autres personnes à rencontrer. En outre, il pourrait être difficile pour l'humain de fournir au robot des détails précis sur la cible en raison du nombre de commandes qu'il faudrait mettre en place, mais aussi en raison de la résolution et du débit relativement faible du BCI. De ce fait, le robot n'est pas en mesure de connaitre explicitement la cible mais, il peut néanmoins l'atteindre automatiquement en modifiant sa trajectoire en

fonction de l'objectif de l'humain traduit par l'envoi d'une direction. Par conséquent, le SF du robot se résume uniquement à la modification de sa trajectoire en fonction de la direction souhaitée par l'humain pour atteindre une cible. Le SC du robot concerne quant à lui uniquement la communication d'informations portées sur son activité et son état.

Au niveau opérationnel, les deux agents (humain et robot) ont tous les deux la capacité d'éviter les obstacles. En effet, l'humain peut détecter les obstacles grâce au flux vidéo envoyé par le robot sur l'environnement opérationnel, le robot peut quant à lui les détecter grâce à son capteur à ultrasons (prise et analyse d'informations partagées). Les deux agents peuvent prendre des décisions (décisions partagées), mais seul le robot peut appliquer la décision en modifiant sa trajectoire (implémentation de l'action). L'humain et le robot partagent également des informations l'un sur l'autre. Ils détectent et gèrent les interférences liées à la détection d'obstacles et à la commande via l'ETC (cf. Figure 5-2 : coopérer en terme du SF).

Notons qu'à une distance d'un obstacle inférieure à un seuil, l'autorité de la prise de décision revient au robot. Dans ce cas, la commande finale à exécuter est choisie par le robot. Ce choix est justifié par la capacité limitée de l'humain à réagir rapidement à une situation, en particulier pour commander le BCI, mais aussi du fait de la contrainte inhérente à l'état actuel de la technique dans ce domaine. Ce type d'interaction est encore un problème dans le contrôle par téléopération, pour lequel des retards de transmission imprévisibles peuvent avoir lieu. Le système homme-robot-BCI est mis en œuvre dans la section suivante.

5.2 Implémentation

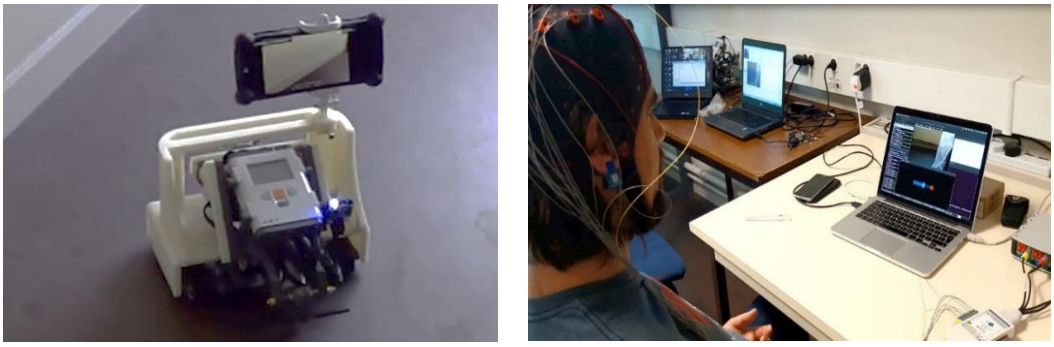
Cette section présente la mise en œuvre d'un système homme-robot composé d'un dispositif BCI conçu pour les personnes tétraplégiques qui comprend principalement trois composants matériels, un ordinateur portable, un BCI et un robot mobile. Dans un premier temps les parties matérielles et logicielles sont présentées. Dans un deuxième temps, l'espace de travail commun conçu est décrit. Dans un troisième temps, les LoA implémentés dans le système sont définis.

5.2.1 Plateforme expérimentale

Dans le cadre du handicap, le matériel utilisé est situé dans deux endroits distincts. L'ordinateur et le BCI pourraient, par exemple, être installés dans la chambre de l'utilisateur (ou une autre pièce de sa maison) (cf. Figure 5-3(b)).

Ils permettent à l'utilisateur de percevoir l'environnement opérationnel et de contrôler le

robot par ses pensées. Les décisions prises par l'utilisateur sont mises à jour en fonction de ses objectifs (par exemple l'endroit où l'utilisateur veut déplacer le robot). Un robot mobile NXT Mindstorms programmé à l'aide du logiciel RobotC (cf. chapitre 4), est mis dans l'environnement opérationnel (une pièce séparée de celle où se trouve l'opérateur) (cf. Figure 5-3(a)). Le robot permet de filmer l'environnement et d'exécuter les actions relatives aux décisions prises par l'utilisateur ou par lui-même si nécessaire. La communication établie entre le robot et l'utilisateur est similaire à celle présentée dans le chapitre 4.



(a) Robot mobile **(b) Ordinateur portable et BCI**

Figure 5-3 Le matériel utilisé pour créer le système homme-robot. La communication entre l'ordinateur et le robot se fait via des modules XBee

5.2.1.1 Poste de contrôle/commande

Le système homme-BCI conçu se compose donc d'un ordinateur portable sous Ubuntu 12.04LTS et d'un BCI. Le matériel du BCI est composé de 16 électrodes actives (g.GAMMA by g. Tec GmbH), positionnées sur le cuir chevelu à l'aide d'un gel, au-dessus du cortex moteur, et connectées à un ordinateur portable via un amplificateur biosignal (g.USBamp).

Un logiciel propriétaire est utilisé, basé sur le système BCI développé par le laboratoire CNBI [14] et EPFL [15] (Leeb et *al.*, 2015), mais modifié pour répondre à nos besoins expérimentaux. Le BCI mis en place dans cette étude repose sur la plateforme d'imagerie motrice développée par CNBI, EPFL (Leeb et *al.*, 2015). Ce paradigme permet de détecter le moment où l'utilisateur imagine ou non le mouvement kinesthésique de sa main gauche ou droite.

Lorsqu'aucune pensée de mouvement n'est détectée, l'autorité du contrôle est allouée au robot. La littérature a montré que ce type de BCI constitue un moyen de contrôle potentiellement viable dans de nombreuses applications, par exemple dans l'utilisation des

[14] Chair in Non-Invasive Brain-Machine Interface
[15] École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse

fauteuils roulants (Carlson & Millan, 2013) ou des exosquelettes (Lee et *al*., 2017). En suivant l'approche proposée par l'EPFL, l'activité électrique du cerveau est mesurée d'une manière non-invasive[16] à l'aide de la méthode de l'électroencéphalographie (dite EEG). L'EEG est enregistré à une fréquence de 512 Hz. Un filtre Laplacien est appliqué afin d'améliorer la qualité de la transmission des informations (rapport signal sur bruit). Des détails techniques supplémentaires sont fournis en Annexe F. Une commande est envoyée lorsque la valeur obtenue dépasse un certain seuil, ce seuil est spécifique à chaque utilisateur. Par exemple, une commande « tourner à droite » est envoyée lorsqu'une imagerie de la main droite est détectée (cf. Figure 5-4).

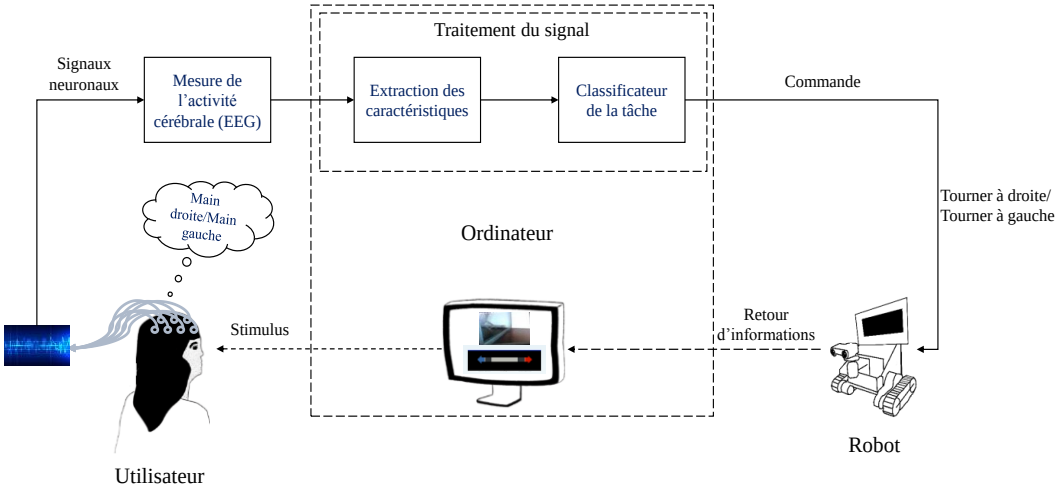


Figure 5-4 Schéma de conception d'un système BCI pour le contrôle à distance d'un robot mobile

Un ETC est conçu à l'aide de scripts bash et de l'utilitaire « wmctrl », la fenêtre du retour BCI est ajoutée à la vidéo reçue du robot (cf. Figure 5-5).

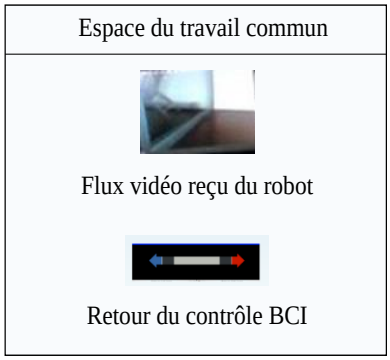


Figure 5-5 ETC : retour vidéo de l'environnement dans lequel le robot évolue et retour visuel du BCI.

[16] En médecine ce mot est relatif à une méthode de soins ne nécessitant pas une lésion de l'organisme (Larousse)

Le retour visuel du BCI qui permet de choisir la commande de droite ou gauche affiche à l'utilisateur une représentation du décodage du signal cérébral en cours afin qu'il puisse ajuster si nécessaire la commande via ses pensées matérialisées par le mouvement de la barre grise centrale. Celle-ci produit des signaux neuronaux qui sont récupérés et traités par l'ordinateur.

Afin de réaliser le contrôle via le BCI, l'utilisateur doit détendre ses mains et imaginer le mouvement kinesthésique de sa main gauche ou droite (suivant la commande qu'il souhaite envoyer au robot). La barre grise se déplace dans la direction de la main dont le mouvement est imaginé. Le déplacement de la barre traduit l'intention de l'utilisateur si le modèle implémenté dans le BCI est bien entraîné et correctement calibré pour l'utilisateur.

L'utilisation d'un tel dispositif exige un niveau important de concentration de la part de l'utilisateur. Il doit par exemple, éviter de penser à autre chose, mais aussi de s'abstenir de cligner des yeux trop souvent ou de contracter d'autres muscles. Le but est d'éviter toute perturbation dans la détection et le traitement des signaux neuronaux. Notons que pour les personnes tétraplégiques, les risques de déclencher ces perturbations sont moins importants, du fait qu'elles sont atteintes d'une paralysie de grands groupes musculaires et qu'elles ont tendance à ne pas avoir de contrôle volontaire sur ces derniers.

5.2.1.2 Implémentation des niveaux d'automatisation

L'implémentation de la détection d'obstacles par le capteur à ultrasons correspond à celle présentée dans le chapitre 4. Deux types d'automatisation ont été considérés dans ces études. Le premier type concerne le SF du robot et le second le SC du robot/BCI, au niveau opérationnel au cours de l'évitement d'obstacles.

Compte tenu du SF du robot, deux LoA sont implémentés : avec et sans le contrôle partagé entre l'humain et le robot dans la modification de trajectoire pour l'évitement d'obstacles. Dans la suite du texte nous allons associer à ces niveaux les abréviations : Sh (Shared control) « contrôle partagé » et NSh (No Shared control) « sans contrôle partagé ». Le LoA Sh est caractérisé par la prise de décision partagée entre l'humain et le robot dans l'évitement d'obstacles traduit par une modification de direction (trajectoire). Ce niveau correspond au LoA « semi-autonome » défini dans le chapitre 3. À ce niveau, le robot détecte les obstacles à partir d'une distance inférieure à 40 cm. Lorsque cette distance est inférieure à 25 cm, le robot a l'autorité pour prendre la décision et éviter l'obstacle détecté (le robot ne prend plus en compte les commandes de l'humain). Si la distance est inférieure à 10 cm, le robot s'arrête. Notons que dans le cas où le robot implémente l'action relative à la décision de l'humain, il tourne de 45°,

mais quand il implémente l'action de sa propre décision, il tourne de 20°. Nous estimons qu'au niveau pratique, le robot peut facilement tourner successivement de 20° afin de pouvoir réaliser une trajectoire ajustée. Par contre, il serait difficile à l'humain de délivrer beaucoup de commandes par le BCI sans atteindre une charge mentale trop importante. Au LoA NSh, le robot avance tout droit sans contourner les obstacles, mais il s'arrête sur les obstacles comme précédemment. Dans ce cas, l'humain doit anticiper les commandes afin d'éviter les arrêts sur les obstacles.

Les deux LoA du SC concernent la détection et la gestion d'interférences liée à la modification de trajectoire pour l'évitement d'obstacles. Les niveaux implémentés sont : EH (Emulated Haptic feedback) « le retour haptique émulé » et NEH (No Emulated Haptic feedback) « sans le retour haptique émulé ». Un contrôle haptique émulé par BCI a été défini et implémenté. Il est basé sur la même idée que le contrôle haptique employé en robotique, en aéronautique (retour de force dans un joystick) et en conduite automobile (retour d'effort au volant) (Abbink, Mulder, & Boer, 2012). Dans le cas d'un contrôle par BCI, il n'est pas question d'un réel retour haptique car aucun muscle ne peut être impliqué dans le contrôle pour suivre ou s'opposer à la direction fournie par le système automatisé. Cependant, l'idée revient à imiter ce comportement haptique à l'aide d'un affichage visuel présenté sur l'ETC. Le retour visuel haptique émulé est illustré sur la Figure 5-6.

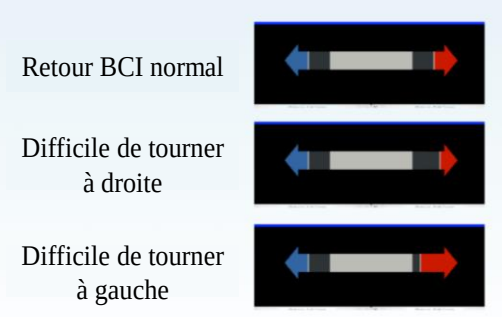


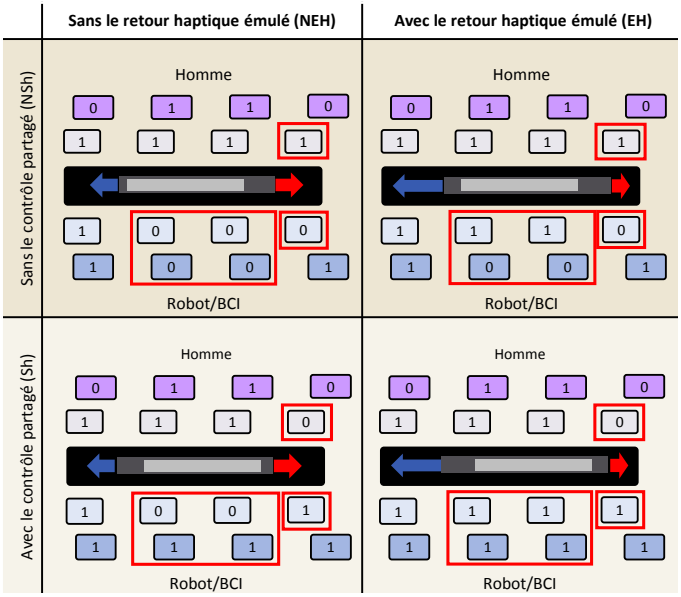
Figure 5-6 Retour visuel du BCI avec le retour haptique émulé

En utilisant cette interface, l'utilisateur déplace la barre grise vers la gauche ou la droite par l'imagerie motrice. Lorsque la barre atteint l'une des deux flèches (rouge ou bleue), la commande correspondante à cette flèche est envoyée au robot (tourner à droite ou à gauche). Le contrôle haptique émulé permet donc selon la direction de l'obstacle détecté (à gauche ou à droite du robot) de faciliter ou de compliquer la tâche d'envoi d'ordre, en terme d'effort mental que l'humain doit fournir. La proximité d'un obstacle provoque la diminution de la taille de la flèche correspondant à la direction où l'obstacle se situe. Ce principe n'est utilisé que pour le niveau EH.

Les interactions entre l'humain et le robot lors de la modification de la trajectoire pour l'évitement d'obstacles (la distance supérieure à 10 cm) sont définies à l'aide du modèle de coopération (cf. chapitre 2). Le Tableau 5-1 représente ces interactions lors de la combinaison des LoA liés au SF au SC du robot/BCI.

Le tableau souligne une augmentation du LoA lié au SF (augmentation verticale) et celui lié au SC (augmentation horizontale) du robot/BCI pour la détection et la gestion d'interférence. Ainsi, nous constatons un changement verticale d'autorité (4ème case du SC). L'autorité revient au robot dans le contrôle partagé lorsque le robot détecte un obstacle à une distance inférieure à 25cm.

Tableau 5-1 chaque partie du tableau présente pour chaque agent (Humain et robot) son SF (rectangles violet et bleu respectivement) et son SC (rectangles gris clair). Si l'agent a la capacité d'effectuer une sous-fonction, « 1 » est écrit dans le rectangle sinon « 0 ». L'ETC se concentre ici sur le retour visuel du BCI (flèches et barre grise centrale).



Une étude pilote est réalisée dans le but de valider techniquement le système homme-robot et d'étudier la coopération entre l'humain et le robot suivant les différents LoA présentés ci-dessus. Celle-ci est décrite dans la section suivante.

5.3 Évaluation

L'étude préliminaire a pour objectif d'évaluer la faisabilité technique du système homme-robot-BCI présenté précédemment, et notamment le retour haptique émulé. N'ayant été réalisé que par un participant, elle a été suivie par une autre étude menée avec plus de participants et des principes améliorés sur la base des premiers résultats. Ces études utilisent le système

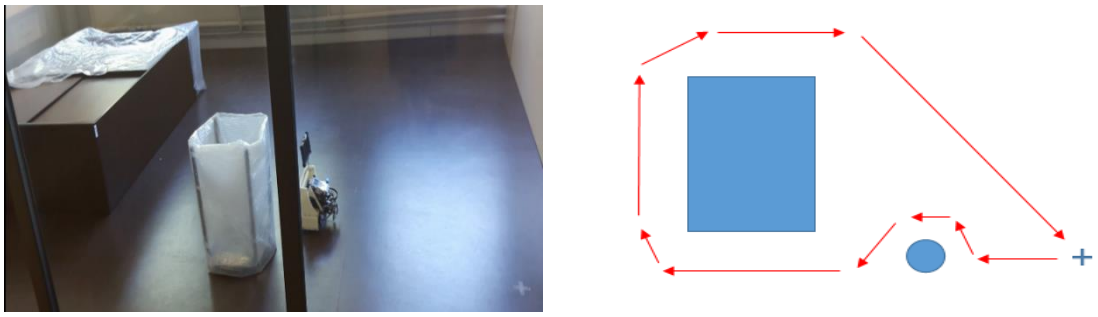
homme-robot et les LoA présentés dans la section précédente (cf. section 5.2.1.2). Pour chaque étude expérimentale nous présentons la méthode expérimentale puis les résultats. Enfin, une discussion des résultats et une conclusion sont données.

5.3.1 Étude préliminaire

5.3.1.1 Méthode

5.3.1.1.1 Mission

Dans cette étude, le système homme-robot-BCI a pour mission d'explorer un environnement (cf. Figure 5-7(a)) tout en respectant un parcours prédéfini représenté par des flèches rouges sur la Figure 5-7(b). Les points de départ et d'arrivée sont les mêmes (le signe plus sur la Figure 5-7(b). L'environnement expérimental contient principalement deux obstacles, le cercle et le rectangle sur la Figure 5-7(b).



(a) Environnement réel **(b) Représentation graphique**

Figure 5-7 Environnement expérimental

5.3.1.1.2 Participants

Un participant de 32 ans a pris part à l'étude. Il était bien entraîné à l'utilisation du BCI de par sa participation à sa conception, mais aussi par le fait qu'il a été mené à utiliser régulièrement le robot.

5.3.1.1.3 Protocole

Avant de procéder aux tests expérimentaux, une session d'entraînement a été effectuée par le participant. La session est divisée en deux séances : une dédiée au BCI et une autre au robot. La première séance est composée de deux phases.

Durant la première phase, le participant est équipé d'un bonnet composé de 16 électrodes collées sur son cuir chevelu. Le bon fonctionnement du système est évalué en analysant le signal de chaque électrode et en ajustant les filtres appliqués pour minimiser d'éventuelles perturbations. Le participant contrôle le retour visuel en mode « hors ligne » en essayant de penser au mouvement à associer à la barre grise. L'objectif de cette phase est d'entraîner le

système et de créer un classifieur initial à partir des schémas spécifiques des signaux cérébraux du participant enregistrés par l'ordinateur branché au BCI.

Au cours de la seconde phase, le participant contrôle directement le mouvement de la barre grise du retour visuel avec le BCI en mode « en ligne ». À partir de ces données d'apprentissage, le classifieur du participant est mis à jour.

La deuxième séance d'entraînement permet à l'utilisateur de s'entrainer au contrôle du robot par le BCI suivant quatre LoA différents définis dans la section 5.2.1.2. Après la session d'entraînement, l'étude s'est déroulée suivant quatre conditions expérimentales relatives aux LoA (cf. Tableau 5-2). Deux tests consécutifs ont été effectués par le participant pour chaque condition expérimentale. Les mesures réalisées durant l'expérimentation sont présentées dans la partie suivante.

Tableau 5-2 Quatre conditions expérimentales ont été testées : avec ou sans le retour haptique émulé en combinaison avec ou sans le contrôle partagé

	Sans le contrôle partagé « NSh »	Avec le contrôle partagé « Sh »
Sans le retour haptique émulé « NEH »	**Sans le retour haptique émulé, sans le contrôle partagé « NEHNSh »**	**Sans le retour haptique émulé, avec le contrôle partagé « NEHSh »**
Avec le retour haptique émulé « EH »	**Avec le retour haptique émulé, sans le contrôle partagé « EHNSh »**	**Avec le retour haptique émulé, avec le contrôle partagé « EHSh »**

5.3.1.1.4 Mesures

La coopération homme-robot-BCI avec un retour haptique émulé est évaluée à partir des mesures objectives et subjectives réalisées à chaque essai expérimental.

5.3.1.1.4.1 Mesures objectives

Les mesures objectives concernent le nombre de commandes envoyées par le BCI et le temps de réalisation de la mission.

5.3.1.1.4.2 Mesures subjectives

Il a été demandé au participant de répondre à un questionnaire à la fin de chaque condition expérimentale. Ce questionnaire a été réalisé à partir du modèle de coopération (cf. Annexe G). Les questions ont principalement porté sur la perception du participant du SF et du SC du robot/BCI et sur son sentiment quant à la façon dont le robot perçoit son SF et SC sur les quatre sous-fonctions. Les réponses du participant aux questions ont été mesurées en utilisant l'échelle

de Likert de 1 (pas du tout) à 7 (parfaitement).

Un codage des prises de décision du participant et du robot et des actions de ce dernier a été réalisé à partir d'enregistrements vidéo et de fichiers log.

5.3.1.2 Résultats

Les résultats sont issus à la fois des mesures objectives et subjectives obtenues au cours des expérimentations. Le premier résultat concerne l'incapacité du participant à mener à bien le test avec le plus faible LoA (NEHNSh). Après plusieurs essais, on a constaté qu'il était trop difficile au participant de contrôler le robot sans aucune assistance automatique. Par conséquent, les résultats concernent uniquement les données obtenues lors des trois autres conditions expérimentales (EHNSh, NEHSh et EHSh).

5.3.1.2.1 Résultats basés sur les mesures objectives

Les résultats basés sur les mesures objectives portent sur l'analyse des variables dépendantes suivantes : le nombre de commandes envoyé par le BCI et le temps de réalisation de la mission.

Nombre de commandes envoyé par le BCI

La Figure 5-8 représente le nombre de commandes envoyées par le BCI pendant chacune des trois conditions expérimentales (EHNSh, NEHSh et EHSh). Pour chaque condition expérimentale, la barre de gauche représente le nombre de commandes envoyées par le participant lors du premier test, et la barre de droite celui envoyé lors du deuxième test. L'assistance par évitement d'obstacles a permis au participant de contrôler le robot.

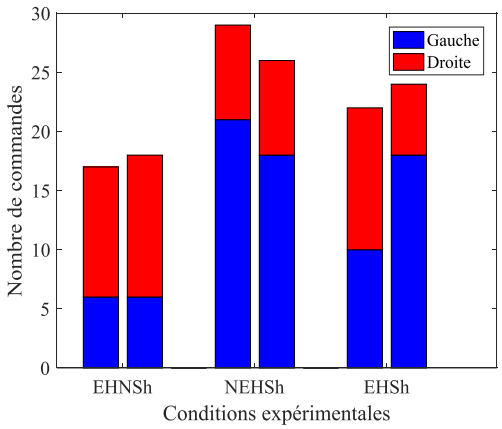


Figure 5-8 Nombre de commandes envoyées par le BCI

De plus, l'utilisation de l'assistance par retour haptique émulé sans l'évitement d'obstacles a permis de faciliter le contrôle et d'avoir une meilleure performance. Cependant,

la combinaison des deux assistances (EHSh) n'a pas permis d'améliorer la performance du participant.

Temps de réalisation de la mission

Les résultats ont montré que le temps de réalisation de la mission a une tendance similaire au nombre de commandes envoyées par le BCI (cf. Figure 5-9).

Néanmoins, les différences entre les conditions expérimentales sont moins importantes pour le temps de l'accomplissement de la mission. Les résultats ont indiqué que le participant a pris moins de temps pour réaliser la mission dans EHNSh en comparaison avec les deux autres conditions (NEHSh et EHSh). Les résultats basés sur les mesures subjectives sont présentés dans la section suivante.

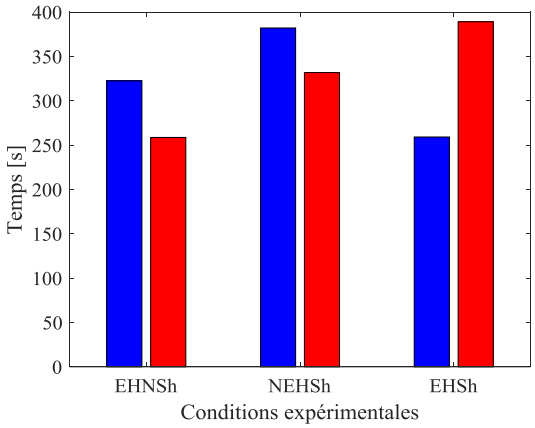


Figure 5-9 Temps de réalisation de la mission

5.3.1.2.2 Résultats basés sur les mesures subjectives

Les résultats subjectifs portent sur l'analyse des réponses aux questionnaires et à l'analyse des enregistrements vidéos.

Questionnaire

Les résultats des réponses au questionnaire construit sur la base du modèle de coopération ont montré une moyenne plus élevée des évaluations du SF et du SC du robot/BCI dans la condition expérimentale sans le contrôle partagé « EHNSh » (moyenne : EHNSh : 5.07 ; NEHSh : 4.27 ; EHSh : 3.93). L'évaluation du SC du robot/BCI par le participant a souligné une plus grande différence entre les conditions expérimentales (moyenne de l'écart type : 1,4). Dans la condition sans le retour haptique émulé « NEHSh », les réponses ont souligné la faible capacité du participant à obtenir des informations concernant sa coopération avec le robot (moyenne : EHNSh : 5.75 ; NEHSh : 3.0 ; EHSh : 4.25). En outre, les résultats ont souligné un meilleur sentiment de contrôle dans la condition sans le contrôle partagé « EHNSh » (moyenne

: EHNSh : 6.0 ; NEHSh : 3.0 ; EHSh : 3.0).

Enregistrements vidéos

L'analyse des vidéos et des commentaires du participant soulignent des situations particulières. La première montre une bonne coopération entre le participant et le robot lorsque le participant envoie une commande de 45° (à droite ou à gauche) afin d'ajuster la trajectoire du robot et atteindre l'objectif, corrigé par la suite par le robot pour éviter un obstacle, en tournant de 20°. La seconde situation concerne l'évitement d'obstacles par le robot lorsque le participant lui envoie une mauvaise commande pouvant entraîner une collision, en particulier lors du contrôle sans retour haptique émulé. Il est à noter que l'assistance au niveau de l'évitement d'obstacles a toujours permis au robot de s'arrêter lorsque l'obstacle détecté est trop proche et aussi de corriger l'erreur du participant. Néanmoins, le robot ne connaît pas la cible finale et peut donc choisir la mauvaise direction pour l'atteindre lorsqu'il contourne un obstacle. Dans ce cas, le participant est amené à corriger la direction du déplacement du robot en lui envoyant plusieurs commandes correctives. Cette situation risque de provoquer une augmentation non négligeable de la charge mentale et de la frustration de l'utilisateur. Cependant, dans le cas de l'assistance par le retour haptique émulé, l'erreur du participant pouvait être directement liée à une mise à jour instantanée de la longueur des flèches sur l'interface du BCI (pour rappel cette longueur dépend de la distance à l'obstacle). Lorsque la barre grise est à une certaine position et que la longueur des flèches change, la barre pouvait être très proche d'une des flèches et l'utilisateur pouvait ne pas avoir le temps nécessaire pour réagir à ce changement, ce qui pouvait entraîner l'envoi d'une commande non désirée (Pacaux-Lemoine, Habib, & Carlson, 2018).

5.3.1.3 Discussion

Les résultats ont montré que l'utilisateur n'était pas en mesure de mener à bien la mission sans assistance (faible LoA), c'est-à-dire sans l'évitement d'obstacles et sans le retour haptique émulé (NEHNSh). Les résultats objectifs ont montré que la meilleure performance a été obtenue avec l'assistance de l'haptique émulé au niveau de l'envoi de commande et sans assistance par évitement d'obstacles (EHNSh). En effet, lors des conditions expérimentales avec évitement d'obstacles, le robot évite les obstacles de manière proactive dans la direction opposée à la position de l'obstacle. Autrement dit, si le robot détecte l'obstacle se trouvant à sa gauche, il décide de tourner à droite et si l'obstacle est à sa droite, il décide de tourner à gauche. Dans certains cas, ce comportement du robot peut ne pas répondre aux attentes de l'utilisateur et ainsi ne pas convenir au but final qui n'est connu que par l'utilisateur. Ce dernier doit donc envoyer

plusieurs commandes correctives afin de modifier la direction du robot (par exemple, 180 degrés pour revenir en arrière et franchir l'obstacle de l'autre côté). En outre, le robot est seulement capable d'éviter les obstacles en fonction de sa trajectoire actuelle, car il n'a pas connaissance des intentions des futures commandes potentielles de l'utilisateur. Nous avons aussi constaté que le BCI est capable d'induire l'utilisateur en erreur en envoyant une commande non voulue.

Le retour haptique émulé est basé sur les mêmes données de capteur utilisées par le robot pour l'évitement d'obstacles. Toutefois, au lieu de retirer toute autorité à l'utilisateur et éviter automatiquement les obstacles, le retour haptique émulé module l'effort requis pour l'envoi d'une commande. De cette manière, l'utilisateur a l'autorité du contrôle en fournissant la direction du mouvement du robot ou en l'ignorant.

5.3.1.4 Conclusions et perspectives

Cette étude préliminaire souligne la possibilité de la mise en œuvre du concept de l'assistance par un retour haptique émulé pour le contrôle d'un robot via une interface cerveau-machine. Plus de participants sont requis afin de pouvoir mieux évaluer le système BCI/robot. Néanmoins, cette expérimentation a permis de relever les points positifs et négatifs d'un tel système sous différents LoA. Le LoA offrant l'assistance avec le retour haptique émulé et sans la modification de trajectoire pour l'évitement d'obstacles (EHNSh) semble offrir une meilleure coopération homme-robot-BCI. Ce résultat peut être lié au manque du SF du robot au niveau tactique, ou à un manque du SC du robot dans son interaction avec l'utilisateur. Fournir plus d'informations concernant l'intention du robot sur l'ETC, pourrait améliorer le SC de l'utilisateur. Ces informations peuvent par exemple représenter la direction et la distance perçues par le robot par rapport à un obstacle. Néanmoins, ces informations doivent être ajoutées de manière à ce que l'utilisateur ne bouge pas ses yeux davantage, car ceci pourrait dégrader la qualité du signal EEG. Cette idée fait d'ailleurs l'objet de la seconde étude.

5.3.2 Étude complémentaire

5.3.2.1 Méthode

5.3.2.1.1 Mission

La mission à réaliser dans cette étude est similaire à l'étude précédente, à savoir suivre une trajectoire prédéfinie, cette fois matérialisée par un ruban blanc collé au sol (cf. Figure 5-10). L'environnement opérationnel contient un ensemble d'obstacles à éviter.

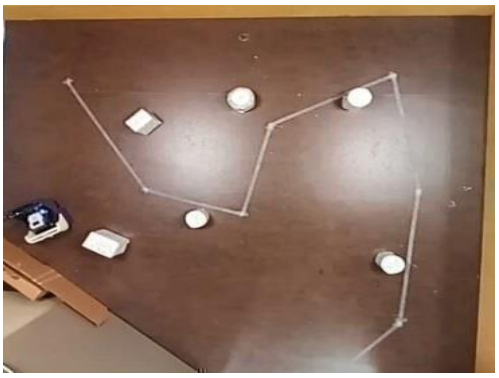


Figure 5-10 Environnement expérimental

5.3.2.1.2 Participants

Cinq participants ont participé à l'expérimentation, 4 femmes et 1 homme âgés entre 21 et 33 ans (moyenne 26,4; écart type 4,67). Trois participants n'ont jamais utilisé le BCI avant l'expérimentation et deux l'ont quelquefois utilisé. Trois participants ont quelquefois utilisé un robot, un participant n'en a jamais utilisé et un autre en a souvent utilisé. Les participants ont un minimum un niveau d'études de BAC+4.

5.3.2.1.3 Protocole

Une session d'entraînement pour chaque participant a précédé les expérimentations. Elle est semblable à celle réalisée dans l'étude préliminaire (cf. section 5.3.1.1.3). Dans cette étude, la seconde séance d'entraînement a eu lieu environ trois jours après la première.

Au début de la seconde séance, chaque participant reçoit une description de l'expérimentation. Les participants ont eu une présentation de toute la plateforme expérimentale (l'interface du BCI, l'interface du retour visuel et le robot). Cette séance leur a permis de se familiariser avec le comportement et le contrôle du robot via le BCI. Dans quatre tests différents, ils se sont entraînés sans et avec le retour haptique émulé, sans et avec le contrôle partagé. Cette séance d'entraînement a eu lieu dans un environnement spécifique mais avec des obstacles comparables à ceux de l'environnement expérimental. Cette séance a été proposée au début de chaque nouvelle condition expérimentale et durait 10 min. Elle s'est déroulée en présence d'un expérimentateur afin de répondre aux questions relatives à l'expérimentation.

L'étude s'est déroulée suivant les quatre conditions expérimentales semblables à celles de l'étude préliminaire (cf. Tableau 5-2). L'ordre de passage a été contrebalancé afin d'éviter les effets d'ordre et d'apprentissage.

Le comportement du robot lors du contrôle partagé « Sh » a été amélioré de façon à réduire les erreurs de direction réalisées par le robot (direction qui ne correspond pas aux attentes de l'opérateur humain). Lors de ce nouveau comportement, le robot n'évite pas les

obstacles lorsque la distance est inférieure à 25 cm. Cependant, si la distance est inférieure à 10 cm, il s'arrête et attend la décision de l'opérateur humain (commande de tourner à droite ou à gauche). Pendant un laps de temps, si le robot ne reçoit pas de commande, il recule jusqu'à atteindre une distance supérieure à 10 cm de l'obstacle. Le robot décide alors de tourner à gauche ou à droite en fonction de la position de l'obstacle. Il tourne dans le sens opposé à l'obstacle. Dans ce cas le robot se voit attribuer l'autorité et il met en œuvre sa propre décision même si pendant ce temps-là l'utilisateur envoie une commande. Les quatre tests ont suivi le même scénario présenté dans la section 5.3.2.1.1.

En outre, le SC du robot a été amélioré de façon à permettre à l'utilisateur de mieux comprendre les intentions du robot, c'est-à-dire améliorer la conscience de la situation de l'utilisateur. En raison de la vision restreinte de la caméra, une surimpression d'un radar sur le retour visuel du robot a été ajoutée dans l'ETC, identique à celui utilisé sur l'interface de contrôle développée dans le chapitre 4). Il permet d'informer l'utilisateur de l'orientation et de la proximité des obstacles (cf. Figure 5-11).

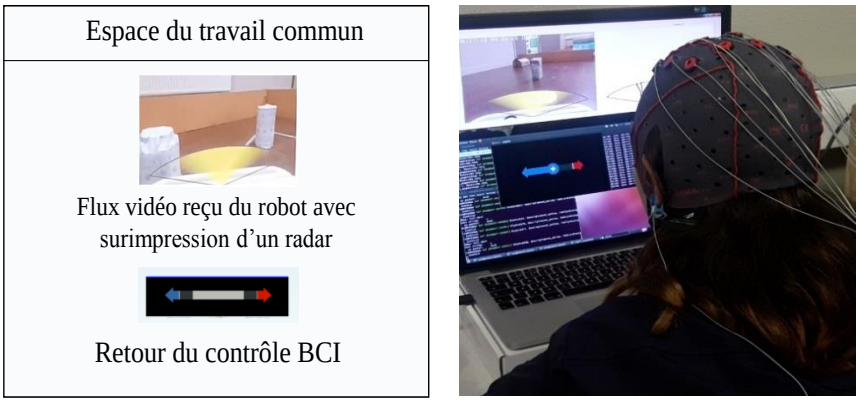


Figure 5-11 Amélioration de l'ETC. L'utilisateur est informé de l'orientation et de la proximité de l'obstacle grâce à l'affichage radar superposé sur le retour visuel du robot.

5.3.2.1.4 Mesures

5.3.2.1.4.1 Mesures objectives

Les mesures objectives suivantes ont été prises durant les tests expérimentaux :

- Le nombre de sections correctement parcourues
- Le nombre de boucles effectuées afin de suivre chaque section (voir Figure 5-12)
- Le nombre de collisions
- Le nombre d'arrêts du robot
- Le nombre d'évitements d'obstacles automatiques réalisés par le robot

- La précision en ligne du BCI liée à la performance de chaque participant

5.3.2.1.4.2 Mesures subjectives

Les mesures subjectives réalisées concernent :

- Les réponses à un questionnaire portant sur l'expertise des participants
- Les réponses à un questionnaire sur le modèle de coopération (cf. Annexe G)
- La charge de travail calculée à partir du NASA-TLX

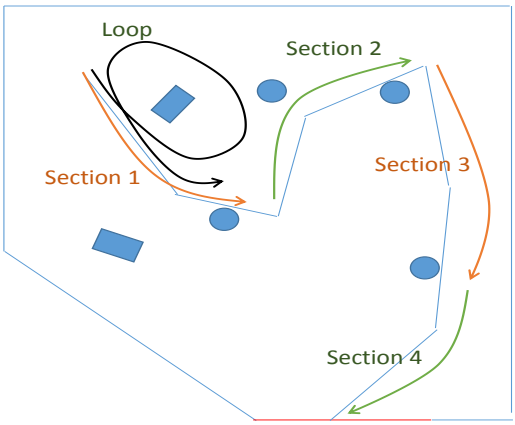


Figure 5-12 Les quatre sections de la trajectoire (sections orange et verte de 1 à 4) et exemple de boucle (loop en noir)

5.3.2.2 Résultats

Dans un premier temps, la précision des participants dans le contrôle en ligne du BCI est calculée pour chaque session d'entraînement. Dans un second temps, les résultats provenant des mesures objectives et subjectives enregistrées au cours des tests expérimentaux avec le robot sont présentés. De plus, un codage des actions des participants a été réalisé de façon à permettre l'identification des performances globales du système homme-robot-BCI dans chaque condition expérimentale et d'évaluer la qualité de la coopération.

5.3.2.2.1 Précision du BCI

La précision du contrôle en ligne du BCI (sans le robot) par chaque participant dans chaque séance d'entrainement est donnée sur la Figure 5-13. La séance « 0 » est la dernière séance d'entrainement juste avant l'essai avec le robot. Les participants ont eu besoin d'un nombre différent de séances d'entrainement pour se familiariser et se sentir à l'aise lors de l'utilisation du BCI.

Par exemple, le participant P4 a atteint une précision de 100% lors des 4 premières séances d'entrainement déroulées le même jour, mais le deuxième jour cette précision a baissé à 66,7% lorsqu'on voulait entamer l'essai avec le robot. Plus de séances d'entraînement avec

le BCI ont donc été nécessaires afin de regagner la confiance du participant avant d'utiliser finalement le robot. À l'inverse, lors de la première séance, le participant P5 a eu une précision de 56,7%, mais il s'est rapidement amélioré pour atteindre une précision supérieure à 80%. Le lendemain, le participant P5 a atteint toujours plus de 80%, mais il s'est senti suffisamment en confiance pour commencer les tests avec le robot.

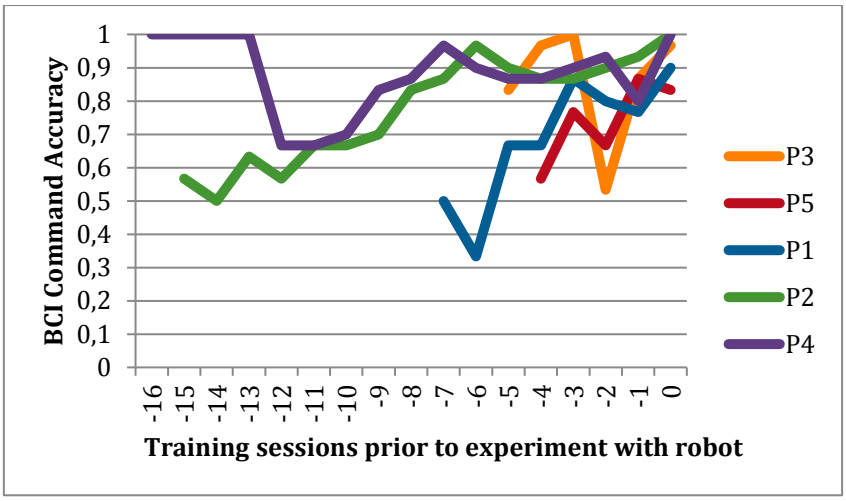


Figure 5-13 Précision du BCI de toutes les sessions d'entrainement en ligne (moyennes %) de chaque participant avant sa participation aux expérimentations avec le robot.

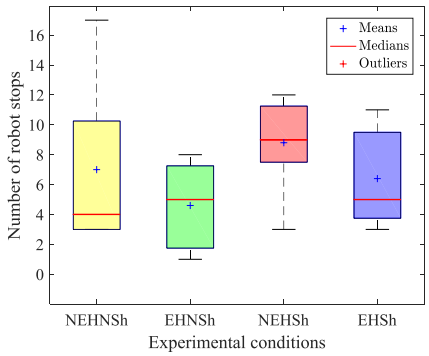
Finalement, nous remarquons que tous les participants ont atteint une précision du BCI de plus de 80% lors de la séance précédant immédiatement les tests expérimentaux avec le robot (la séance « 0 »). En moyenne, tous les participants se sont améliorés au fil du temps dans le contrôle en ligne du BCI, malgré certaines fluctuations pouvant être causées par certains facteurs tels que les légers changements dans l'emplacement physique du bonnet et des électrodes du BCI, les facteurs humains affectant les signaux cérébraux (e. g. fatigue et stress) et la qualité du signal EEG (e. g. conductivité cutanée « transpiration »).

5.3.2.2.2 Résultats basés sur les mesures objectives

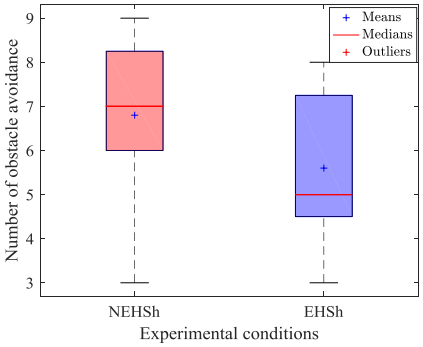
Nombre d'arrêts du robot

La Figure 5-14 représente le nombre d'arrêts et d'évitements d'obstacles traduits par une modification de trajectoire réalisés par le robot dans chaque condition expérimentale. Le robot s'est plus souvent arrêté dans NEHSh lorsque le participant n'est pas assisté par le retour haptique émulé et qu'il a à partager le contrôle de l'évitement d'obstacles avec le robot. À l'opposé, dans la condition avec le retour haptique émulé et sans le contrôle partagé « EHNSh », le robot a effectué moins d'arrêts. En outre, les résultats ont montré que le nombre d'évitements

d'obstacles par le robot est plus faible lorsque le participant est assisté par le retour haptique émulé, ce qui rejoint le résultat précédent.



(a) Nombre d'arrêts



(b) Nombre d'évitements d'obstacles

Figure 5-14 Nombre d'arrêts et d'évitements d'obstacles par le robot

Nombre de commandes BCI

Les résultats ont révélé que les participants ont envoyé un plus faible nombre de commandes durant la condition EHNSh et un plus grand durant la condition NEHSh (cf. Figure 5-15). La combinaison du contrôle partagé avec le retour haptique non émulé fait donc augmenter le nombre de commandes du participant pour le contrôle du robot. Ainsi, les moyennes les plus élevées des commandes envoyées sont obtenues selon les conditions comprenant le contrôle partagé « Sh ».

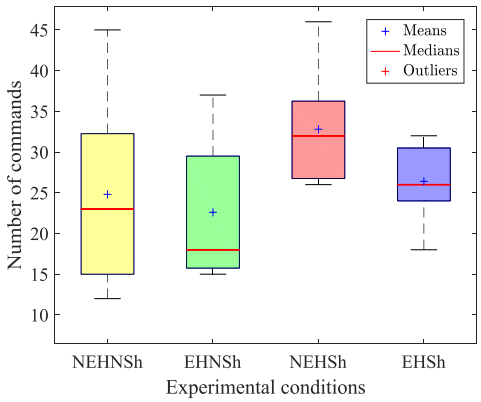


Figure 5-15 Nombre de commandes envoyées par le BCI

Une moyenne des commandes envoyées par chaque participant dans les 4 conditions expérimentales est calculée. Une forte corrélation positive est constatée entre la précision en ligne du BCI et le nombre de commandes envoyées par les participants (r : 0.77).

Nombre de collisions

La condition NEHSh est accompagnée du nombre le plus élevé de collisions et la EHNSh du nombre le plus faible (cf. Figure 5-16). Néanmoins, le nombre moyen de collisions n'est pas très important (moins de 2 en moyenne par condition).

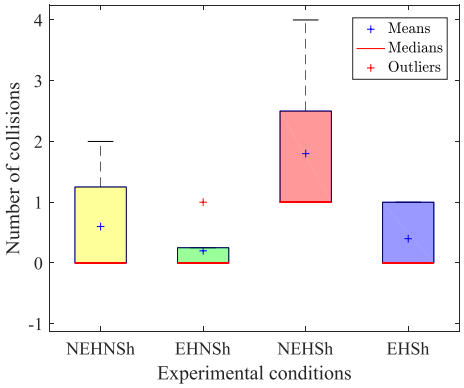


Figure 5-16 Nombre de collisions

Nombre de boucles

En terme du nombre de boucles de trajectoire réalisées pour corriger des erreurs de direction, les résultats ont mis en évidence une similitude dans les moyennes entre les deux conditions comprenant le contrôle partagé « Sh ». Elles ont marqué le plus grand nombre de boucles et la condition « NEHNSh » le plus faible (cf. Figure 5-17).

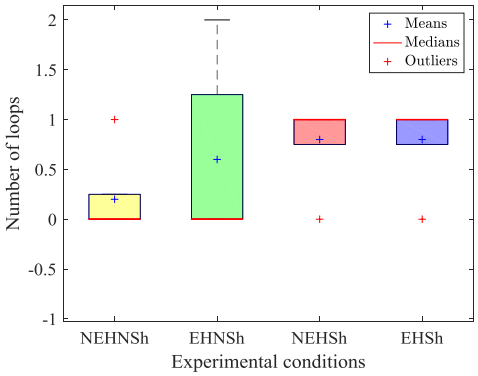


Figure 5-17 Nombre de boucles de la trajectoire réalisée

Nombre de sections correctes

Une moyenne plus élevée de sections correctes de trajectoire est obtenue quand le participant est assisté par le retour haptique émulé et ne partage pas le contrôle avec le robot « EHNSh » (cf. Figure 5-18). Une plus faible moyenne est obtenue selon la condition EHSh. Une moyenne identique est constatée dans les conditions NEHNSh et NEHSh.

En outre, une corrélation positive est constatée entre le nombre de sections correctes réalisées et la précision en ligne du BCI (r : 0.77). Autrement dit, le nombre de sections correctes augmente en fonction de la précision du contrôle en ligne du BCI obtenue pas le participant.

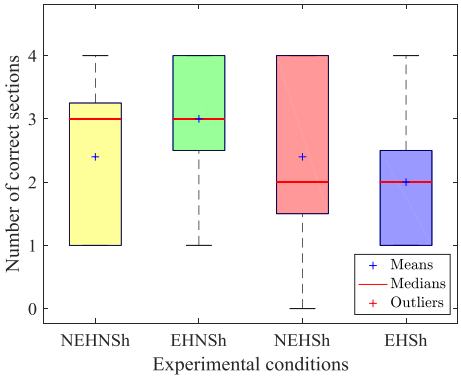


Figure 5-18 Nombre de sections correctes de la trajectoire réalisée

Performance

Un score de performance est calculé pour chaque participant dans les différentes conditions expérimentales. Ce score correspond à la somme du nombre de collisions (coef.: -0,5) avec le nombre de boucles (coef.: -0,5) et le nombre de sections correctes réalisées (cf. Figure 5-19).

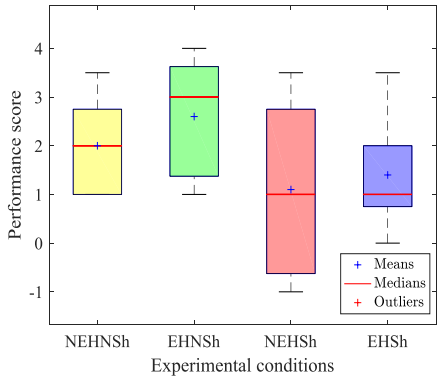


Figure 5-19 Performance globale du système homme-robot-BCI

Les résultats ont montré que la performance globale du système est plus élevée selon les conditions sans le contrôle partagé « NSh ». Ainsi, ces résultats ont souligné une meilleure performance en présence du retour haptique émulé.

5.3.2.2.3 Résultats basés sur les mesures subjectives

Charge de travail

L'évaluation subjective de la charge de travail est effectuée à partir de la méthode NASA-

TLX (cf. Figure 5-20 et Figure 5-21). Cette évaluation est faite de la même manière que dans l'étude du chapitre 4.

Les résultats ont montré que contrairement à l'exigence physique, l'exigence mentale a eu une contribution majeure au ressenti de la charge de travail.

Les participants ont moins ressenti l'exigence mentale, l'exigence temporelle et l'effort durant le retour haptique émulé et le contrôle non partagé. Cependant, durant cette condition les participants ont été moins satisfaits de leur performance. Ils pensent que la condition sans assistance (NEHNSH) est la plus exigeante mentalement et temporellement. De plus, le sentiment d'effort et de frustration est plus élevé lors du retour haptique non émulé et avec le contrôle partagé (NEHSh).

Finalement, les résultats ont montré que la charge de travail globale est plus élevée en absence d'assistance (NEHNSh) et plus faible en présence uniquement de l'assistance par le retour haptique émulé (EHNSh).

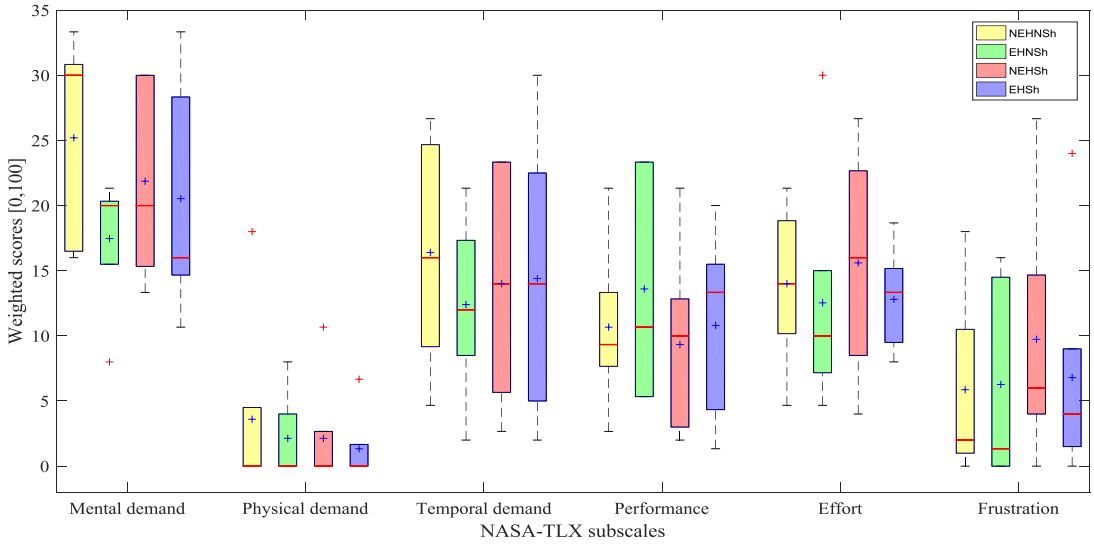


Figure 5-20 Scores ponderés des descripteurs TLX pour chaque condition experimentale. Pour tous les descripteurs (y compris la performance), le score le plus faible est le meilleur

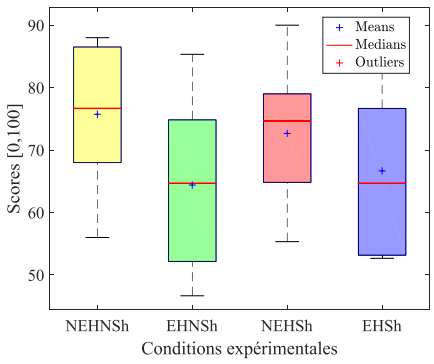


Figure 5-21 Charge de travail totale pondérée

Expertise des participants

Un score d'expertise a été calculé à partir de la somme des réponses des participants sur deux questions : Avez-vous déjà utilisé un robot avant l'expérimentation ? Avez-vous déjà utilisé un BCI avant l'expérimentation ? Chaque participant a fait un choix entre jamais (0), occasionnellement (0,5), parfois (1), souvent (1,5), toujours (2). Les résultats ont révélé une forte corrélation positive entre l'expertise et le nombre d'arrêts du robot devant un obstacle (r : 0.79). De plus, il existe une relation négative forte entre l'expertise et le nombre de boucles dans la trajectoire réalisée par le participant (r : -0.71). Une relation positive est aussi remarquée entre l'expertise du participant et sa performance (r : 0.70).

Evaluation subjective du SF et SC du système robot/BCI

Les réponses aux questions liées aux SF et SC du système robot/BCI ont révélé des différences entre les conditions expérimentales. La moyenne de toutes les réponses du SF et celles du SC sont calculées pour chaque condition. Les participants pensent que le système a de meilleurs SF et SC dans les conditions EHSh et EHNSh respectivement. (SF : NEHNSh : 4,25 ; EHNSh : 5,07 ; NEHSh : 4,4 ; EHSh : 5,27), (SC : NEHNSh : 4,5 ; EHNSh : 5,1 ; NEHSh : 4,32 ; EHSh : 5,07).

5.3.2.3 Discussion

Cette étude complémentaire a permis de relever des résultats liés à la performance du système homme-robot-BCI sous différents LoA.

Les résultats obtenus ont montré une meilleure performance du système homme-robot-BCI dans la condition EHNSh, contrairement à la condition NEHSh où la performance réalisée était la plus faible. L'assistance par le retour haptique émulé permet alors aux utilisateur de réaliser une meilleure performance que l'assistance par l'évitement d'obstacles du contrôle partagé.

Dans le EHNSh, le robot a effectué moins d'arrêts que dans les autres conditions. Ce résultat pourrait être dû à l'assistance du retour haptique émulé qui a tendance à rendre plus difficile l'envoi du robot dans une direction où se trouve un obstacle. Nous avons aussi constaté que le nombre de commandes BCI est supérieur en NEHSh et plus faible en EHNSh. Ce résultat pourrait être justifié par le fait que dans la condition NEHSh, le robot s'arrête souvent devant un obstacle trop proche et l'utilisateur met plus de temps pour envoyer la commande à cause de l'absence du retour haptique émulé. Par conséquent, le robot prend sa propre décision et contourne l'obstacle. Cependant, le robot peut recevoir la commande de l'utilisateur en retard

et ainsi l'éloigner de la trajectoire voulue. L'utilisateur doit alors envoyer plus de commandes afin de corriger la trajectoire du robot. Par contre, dans la condition EHNSh grâce au retour haptique émulé et au contrôle non partagé, le robot s'arrête moins souvent devant un obstacle et attend toujours la commande de l'utilisateur pour contourner l'obstacle. Cela diminue les erreurs de trajectoire ainsi que le nombre de commandes nécessaires pour la corriger. Par conséquent, le nombre de sections correctes de la trajectoire réalisée est plus élevé.

Conformément à ce que nous a montré l'étude préliminaire (cf. section 5.3.1), les nouvelles expérimentations ont permis de souligner la complexité de la tâche à réaliser. En effet, contrôler mentalement un robot demande beaucoup d'attention et de concentration car le robot se déplace progressivement sans connaitre les objectifs (positions à atteindre) et l'opérateur humain le guide en envoyant des commandes de manière à respecter au mieux la trajectoire prédéfinie, tout en évitant les obstacles (pendant plus de 7 min). Dans ce contexte, les évaluations des composantes de charge de travail obtenues par NASA TLX ont révélé que le contrôle via le BCI est exigeant mentalement et beaucoup moins physiquement. La condition EHNSh a permis de réduire la charge de travail cognitive des utilisateurs alors que la NEHNSh semble l'augmenter. En d'autres termes, ne fournir aucune assistance (faible LoA) aux utilisateurs d'un tel système risque de provoquer une charge de travail accrue. Le retour haptique émulé assiste les utilisateurs dans l'évitement d'obstacles en leur permettant de rester plus concentrés et de livrer des commandes plus rapidement. Ce résultat peut aussi justifier le fait que le nombre d'évitements d'obstacles réalisé par le robot soit plus important dans NEHSh que dans EHSh.

Les résultats ont révélé une relation positive entre la précision du BCI (performance des participants dans l'envoi de commandes BCI), le nombre de commandes envoyées et le nombre de sections suivies correctement. Ainsi, les utilisateurs qui sentaient avoir le contrôle du BCI étaient plus à l'aise pour envoyer plusieurs commandes. Ils ont pu réagir plus rapidement et adapter le mouvement du robot de manière à mieux respecter la trajectoire demandée. Ce résultat est soutenu par Leeb et *al.* (2015) qui ont déclaré que les bons utilisateurs du BCI ont tendance à livrer de manière proactive plus de commandes afin de garder un contrôle plus direct sur le robot. L'expertise des utilisateurs influe donc sur leur performance. En effet, les expérimentations ont montré que plus l'utilisateur se sentait expert, plus il était susceptible de prendre de bonnes décisions, plus le robot devait s'arrêter et moins le nombre de boucles résultantes était élevé. Ceci pourrait être dû au fait que les utilisateurs expérimentés ont réussi

à mieux gérer les interférences avec le robot et le BCI pour obtenir de meilleures performances globales.

Des personnes ne présentant pas d'handicap physique ont participé à cette étude. Néanmoins, des travaux antérieurs n'ont montré aucune différence de performances entre ce type d'utilisateurs et ceux atteints d'une déficience motrice pour qui ce système est conçu (Leeb et *al*., 2015).

Des robots simples ont ici été utilisés. Toutefois, la même conception et les mêmes processus peuvent être appliqués à d'autres robots plus sophistiqués, notamment plus fiables, ce qui pourrait augmenter la portée opérationnelle d'un tel système.

5.3.2.4 Conclusion et perspectives

Les résultats de cette seconde étude rejoignent ceux de l'étude préliminaire. Cependant, dans la seconde étude les utilisateurs ont réussi à accomplir la mission avec un faible LoA (NEHNSh). Ce résultat est obtenu grâce aux améliorations de la communication entre le BCI et le robot et aussi grâce au radar ajouté dans l'ETC qui a permis d'améliorer la conscience de la situation de l'utilisateur. En effet, l'utilisateur est informé de la proximité et de l'orientation des obstacles, ce qui lui a permis de mieux comprendre les actions du robot qui n'étaient pas toujours claires dans l'étude préliminaire.

Pour conclure, le LoA traduit par le niveau d'assistance influe sur la performance du système de contrôle via le BCI d'un robot de téléprésence. Nous constatons que l'assistance par le retour haptique émulé lors de l'envoi de commandes via le BCI présente plus d'avantages que le partage de contrôle avec le robot lors de l'évitement d'obstacles. La combinaison des deux assistances ne semble pas améliorer les performances. En plus du LoA du système, les caractéristiques personnelles de l'utilisateur peuvent avoir un effet sur ses performances. En effet, en plus d'une bonne précision BCI, les utilisateurs doivent être rapides dans l'envoi des bonnes commandes aux bons moments afin de suivre efficacement la trajectoire souhaitée. Pour cela, les opérateurs devaient pouvoir rester concentrés afin de garder la barre de contrôle au centre de l'interface BCI lorsqu'ils ne souhaitent pas livrer de commande et avancer tout droit.

D'autres fonctionnalités peuvent être ajoutées à ce système, à savoir arrêter et démarrer le robot de manière volontaire et fiable suivant le souhait de l'utilisateur. De plus, une assistance supplémentaire peut lui être apportée en adaptant de manière dynamique le LoA en fonction de l'état de l'utilisateur. À cet égard, un système BCI capable de surveiller l'état des opérateurs humains peut être envisagé (Blankertz et *al*., 2010). Une méthode concrète d'estimation de la

charge de travail par EEG est proposée par (Brouwer et *al*., 2012). En outre, il est possible d'aider le BCI à reconstruire (en temps réel) le classifieur, en utilisant des potentiels liés à l'erreur (Error Related Potentials « ErrPs »[17]) pour détecter les cas où le BCI ne décode pas correctement l'intention de l'utilisateur (Chavarriaga, Sobolewski, & Millán, 2014). Les ErrPs pourraient aussi être utilisés pour avertir le robot en cas d'une action non souhaitée (erreur). Le signal serait envoyé automatiquement au robot pour qu'il corrige son action (Salazar-Gomez et *al*., 2017).

Le comportement du robot pourrait être amélioré en adaptant de manière dynamique son LoA comme par exemple en l'augmentant lorsque le niveau de charge mentale de l'utilisateur est élevé. Cela pourrait être représenté par la largeur de la barre rectangulaire grise du retour visuel du contrôle haptique émulé : plus la barre est large, plus le LoA et l'autorité du robot sont faibles. Pour ce faire d'autres paradigmes BCI et signaux cérébraux sont nécessaires.

Finalement, les utilisateurs pourraient améliorer leurs performances en terme de contrôle du robot par le BCI à travers plus de sessions de formation. Ceci permettrait aussi d'avoir des schémas cérébraux plus précis des utilisateurs**.**

5.4 Conclusion

Ce chapitre a proposé un système homme-robot utilisant une interface cerveau-machine. Ce système est conçu à l'aide du modèle de coopération. Il a été implémenté et évalué au moyen de deux études empiriques. Une étude préliminaire réalisée avec un seul participant, a permis de valider la faisabilité technique d'un nouveau concept de contrôle via le BCI, nommé retour haptique émulé. Celui-ci assiste l'utilisateur dans l'envoi de commandes et la gestion des obstacles en réduisant l'effort mental fournit. Une étude plus complète a été menée avec cinq participants non handicapés visant à évaluer plus précisément la coopération homme-robot sous quatre conditions expérimentales relatives aux LoA. De manière générale, les résultats ont souligné une meilleure coopération avec le LoA proposant le retour haptique émulé et sans le contrôle partagé (EHNSh).

[17] Signaux se produisant naturellement dans le cerveau en réponse à une erreur

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'objectif des travaux présentés dans ce manuscrit était :

- du point de vue théorique de proposer une approche générique de conception de LoA adaptables.
- du point de vue technique de concevoir des systèmes coopératifs homme-robot(s) et d'évaluer ces systèmes dans deux contextes différents: la gestion de crise et le handicap.

La méthode de conception des LoA proposée utilise les principes de la coopération homme-machine présentés dans le deuxième chapitre. Celle-ci est basée particulièrement sur le modèle de coopération homme-machine prenant en compte les compétences des agents en termes du savoir-faire et du savoir-coopérer. Cette approche vise à déterminer et évaluer toutes les interactions possibles entre l'humain et la machine dans une situation de coopération. Un exemple de scénario a été présenté afin d'offrir une application réelle de la méthode dans le domaine de la robotique mobile de service.

Dans le but de réduire le nombre important de cas d'allocations possibles de fonctions entre l'humain et la machine, des règles ont été définies. On estime que la règle primordiale revient à décomposer la tâche principale (mission) à réaliser par le système homme-machine en sous-tâches selon les trois niveaux d'abstraction : stratégique, tactique et opérationnel. Cela permet d'identifier les compétences et les interactions entre l'humain et la machine à chaque niveau d'abstraction de la réalisation de la tâche. Une première quantification des compétences des agents se fait par le système binaire (« 0 » sans compétence et « 1 » avec compétence). Puis d'autres règles sont appliquées, notamment dépendantes du contexte. Une fois que les règles sont appliquées les combinaisons du savoir-faire et savoir-coopérer de l'humain et de la machine sont obtenues pour chaque sous-tâche à chaque niveau d'abstraction. Ces combinaisons forment les LoA.

L'originalité de cette approche est de permettre d'identifier clairement l'allocation de fonctions et la gestion d'autorité à chaque LoA selon les différents niveaux d'abstraction de l'accomplissement de la tâche. Ainsi, elle permet de souligner toutes les étapes à suivre pour anticiper d'éventuelles interférences pouvant survenir lors d'une coopération homme-machine.

Dans l'intention d'implémenter et d'évaluer la coopération homme-robot sous différents LoA, deux systèmes homme-robots ont été mis en œuvre. Le premier est destiné à la gestion de crise et le second au contrôle à distance d'un robot de téléprésence pour les personnes à mobilité

réduite. Dans ces deux systèmes homme-robots réalisés, les compétences ou savoir-faire de l'agent robotisé et ses compétences de coopération (savoir-coopérer) ont été implémentées. Une importance particulière a été accordée à la mise en œuvre de cette dernière compétence qui est essentielle au bon fonctionnement des systèmes homme-robot réalisés. Un Espace de Travail Commun (ETC) a été conçu dans le but de partager de façon réfléchie et ergonomique les informations communiquées par l'agent robotisé, spécialement sur les informations perçues, donnant une image de sa représentation de la situation.

Le système homme-robots conçu pour la gestion de crise est composé de deux robots mobiles avec trois LoA adaptables par l'opérateur humain et d'un ETC constitué principalement de deux interfaces : tactique et de contrôle. Des tests expérimentaux ont été réalisés pour évaluer la coopération homme-robots et l'adaptation des LoA. Les résultats ont révélé l'influence positive des informations portées sur la complexité du terrain sur la conscience de la situation de l'humain et sur sa confiance portée sur l'utilisation d'un LoA élevé. Cependant, l'humain a exprimé sa préférence d'utiliser le LoA le plus bas lui permettant de contrôler manuellement les robots. Il était intéressant de voir si les caractéristiques personnelles de l'humain avaient un effet sur ses performances. Les résultats ont en effet pu montrer que la pratique des jeux vidéo peut améliorer la capacité de l'opérateur humain à interagir et coopérer avec deux robots. De plus, cette pratique permet de moins ressentir la charge de travail.

L'ajustement du LoA du système en fonction de la complexité de l'environnement dans lequel l'agent robotisé évolue, permet d'avoir une meilleure performance de la mission et de réduire la charge de travail de l'humain. Cependant, le temps de l'accomplissement de la mission et la conscience de la situation de l'humain sont liés négativement à ce qu'il estime être son savoir-faire et savoir-coopérer.

Le système homme-robot conçu dans le cadre du handicap est composé d'un robot mobile et d'un espace de travail commun constitué particulièrement d'une interface de contrôle cerveau-ordinateur et d'un retour visuel de l'environnement robot. Deux études expérimentales ont été réalisées. La première étude visait principalement à étudier la faisabilité de la mise en œuvre d'un nouveau concept d'un contrôle haptique émulé par une interface cerveau-ordinateur. Cette étude a permis de réaliser une validation technique de ce nouveau concept et de relever ses avantages dans la coopération homme-robot notamment sans le contrôle partagé lors de l'évitement d'obstacles. Toutefois, suite à cette étude des améliorations techniques se sont avérées nécessaires notamment portant sur le comportement du robot. Une seconde étude a été donc réalisée, pour laquelle le comportement du robot a été amélioré de sorte à compenser

son manque de savoir-faire au niveau tactique. En accord avec l'étude préliminaire, les résultats de cette étude ont montré une meilleure coopération homme-robot avec le retour haptique émulé et sans le contrôle partagé.

En plus du LoA du système et de l'expertise de l'humain, ses caractéristiques personnelles peuvent avoir un effet sur ses performances. En effet, il a été constaté qu'en plus d'une bonne performance dans l'envoi de commandes par le BCI, l'humain doit envoyer les bonnes commandes de manière plus proactive et au bon moment afin de minimiser les erreurs d'actions réalisées par le robot.

Finalement, nous avons pu mettre en évidence des critères qui peuvent contribuer à l'adaptation des LoA : la complexité de l'environnement, la charge mentale et le temps de négligence.

PERSPECTIVES

À l'issue de ce travail, quatre grandes perspectives peuvent être envisagées :

- une première perspective consiste à traiter des cas d'études de coopération supplémentaires en commençant par la coopération entre un humain et une flotte de robots coopératifs. Une fonction coût pourrait être ajoutée dans l'algorithme de la commande prédictive à base de modèle de façon à munir les robots des capacités nécessaires pour communiquer et éviter les collisions entre eux.
- une deuxième perspective vise à accorder plus d'attention au concept de coopération multiniveau que nous avons proposé. Les études que nous avons menées ont montré l'intérêt du savoir-faire et du savoir-coopérer du robot au niveau tactique. Il serait donc intéressant de les améliorer et pouvoir assurer une coopération homme-robot au niveau tactique.
- une troisième perspective est de modéliser et d'implémenter un système d'aide à l'adaptation dynamique des LoA en se basant sur des critères relatifs à l'état de l'humain, des robots et de l'environnement. Un système est en cours de conception représenté sous forme d'une machine à états. Ainsi, faire évoluer la simplification binaire de la méthodologie de conception de LoA vers la logique floue.
- une quatrième perspective est la mise en place d'un nouveau support physique de l'ETC au niveau tactique. Ce support pourrait être une table interactive équipée de capteurs RFID et associés à des objets tangibles. Cette table donnerait accès à une représentation

symbolique des robots évoluant dans un lieu géographique distant (niveau opérationnel). Les objets tangibles évolueraient en fonction des déplacements des robots, le repositionnement d'un objet tangible par l'humain sur la table interactive donnerait lieu à un envoi d'ordre au robot correspondant évoluant au niveau opérationnel. Ce nouvel ETC permettrait de faciliter la coopération entre plusieurs agents (notamment humains) en partageant les informations nécessaires pour la prise de la bonne décision au bon moment. Il permettrait de rendre l'activité de chaque agent transparente pour les autres et d'établir une conscience de la situation d'équipe (soutien de la coopération entre plusieurs décideurs humains). Une première plateforme a été mise en œuvre, incluant des robots mobiles et une table interactive avec des objets tangibles.

Annexes

Annexe A
Caractéristiques techniques

Pour la conception des interfaces de contrôle et tactique deux librairies principales sont utilisées : Une librairie XBee permettant de disposer de toutes les fonctions utilitaires pour le fonctionnement de la communication sans fil avec le module XBee connecté à l'ordinateur et une librairie SFML Visual Studio 2013 utilisée afin de récupérer en temps réel l'état du joystick connecté à l'ordinateur représentant les actions de l'opérateur humain.

Pour assurer la communication entre l'ordinateur et les robots le matériel suivant est utilisé : Carte NXTBee, clé USB XBee Explorer et module XBee. Le module XBee est un circuit de communication (microcontrôleur) permettant d'établir des communications radio avec d'autres XBee (cf. Figure A-1(c)). Un module XBee de série 2 (réf. XB24-Z7PIT-004 revC) est monté sur une carte NXTBee fabriquée par Dexter Industrie (cf. Figure A-1(a)). Cette dernière est branchée au port 4 de la brique et permet d'interfacer le robot avec d'autres modules RF XBee similaires. Afin d'assurer la communication du robot avec l'ordinateur, un autre module XBee est monté sur une carte USB XBee Explorer Sparkfun connecté à l'ordinateur (cf. Figure A-1(b)).



(a) NXTBee (b) USB XBee (c) Module XBee

Figure A-1 Matériel utilisé pour la communication sans-fil XBee

Tous ces capteurs sont branchés par des câbles HiTechnic Exteded Connector (Fiches RJ12) aux ports (1, 2, 3, 4) de la brique du robot.

La brique est composée principalement d'un microprocesseur 32 bits ARM7 d'ATMEL, d'une interface où est affiché un ensemble d'informations, d'une prise d'alimentation permettant de recharger la batterie intégrée (capacité de 2100 mAh), de trois ports de sortie (A, B et C) pour la connexion des moteurs, de trois ports d'entrée (1, 2, 3, 4) pour la connexion de capteurs et d'un port USB 2.0 (12 Mb/s) pour assurer la connexion avec un ordinateur.

Annexe B
Rotation du capteur à ultrasons

Le moteur tourne jusqu'au moment où l'ultrason détecte un obstacle à une distance inférieure à la distance maximale ($d_{obs} \leq d_{\max}$). Cependant, si la distance à l'obstacle est inférieure à une distance minimale $d_{obs} \leq d_{\min}$, l'obstacle détecté est trop proche (cf. Figure A-2).

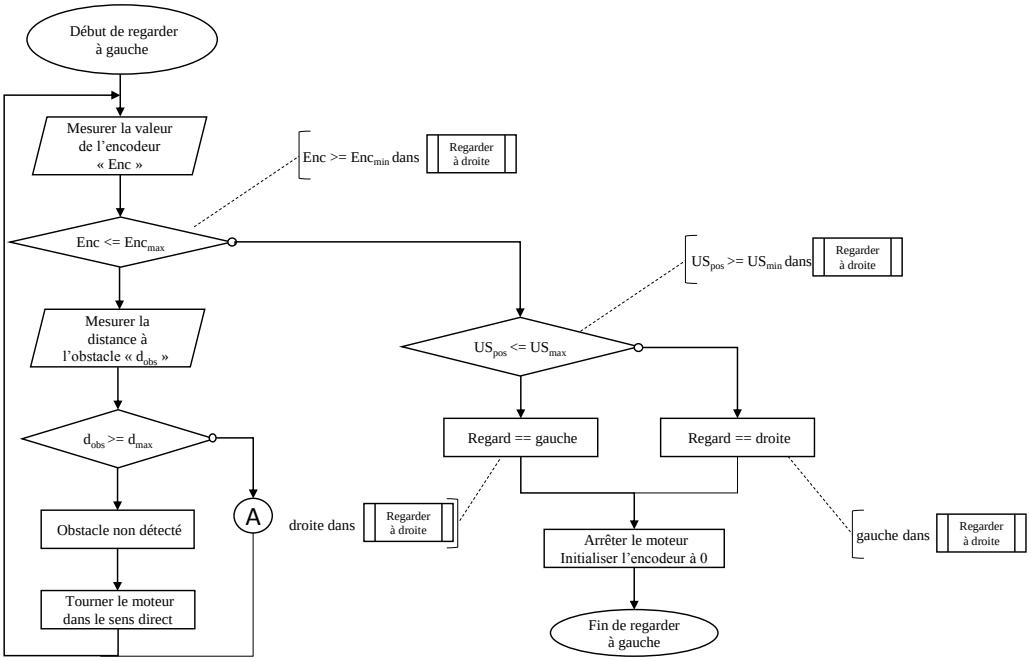


Figure A-2 Logigramme du programme qui gère la rotation du capteur à ultrasons

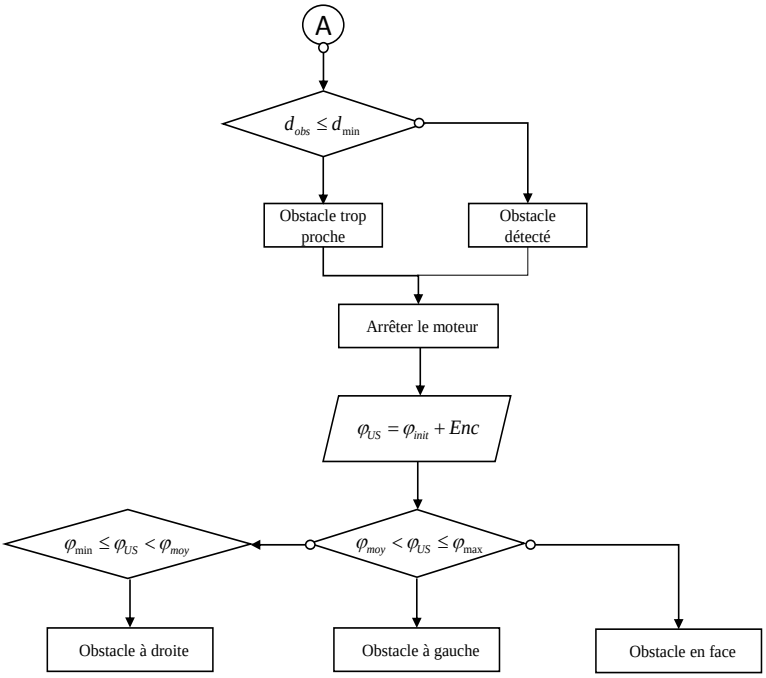


Figure A-3 Logigramme de la partie A du programme qui gère la rotation du capteur à ultrasons

L’orientation de l’obstacle est calculée à partir de la position du capteur à ultrasons obtenue en fonction de la valeur de l’encodeur du moteur ($\varphi_{US} = \varphi_{init} + Enc$) avec φ_{init} la position angulaire de l’ultrason au début de chaque rotation $|\varphi_{init}| \leq \varphi_{\max}$. Si $\varphi_{\min} \leq \varphi_{US} < \varphi_{moy}$, l’obstacle est à droite, sinon si $\varphi_{moy} < \varphi_{US} \leq \varphi_{\max}$, l’obstacle est à gauche, sinon l’obstacle est en face (cf. Figure A-3).

Annexe C
Etablissement de la Communication XBee

Protocole de communication « Zigbee » :

Le mot « Zigbee » désigne un protocole de communication sans fil simple, à faible consommation énergétique et à faible coût. Il est basé sur la norme IEEE 802.15.4 pour les réseaux à dimension personnelle (Wireless Personal Area Networks : WPANs). Un réseau Zigbee peut supporter des topologies différentes, telles que les réseaux point-à-point, point à multipoints et maillé. Ce protocole de communication intervient sur 4 couches du modèle OSI[18] : physique, liaison, réseau et application.

Dans un réseau Zigbee, un module XBee peut-être de type coordinateur, end device ou routeur.

Coordinateur : il permet de créer le réseau, il y a forcément et uniquement un coordinateur par réseau Zigbee. Il représente le nœud principal du réseau et définit le réseau grâce au paramètre « Personal Area Network Identifier » (PAN ID).

Routeur : c'est un nœud du réseau. Il peut envoyer et recevoir des données des autres nœuds du réseau et peut permettre à d'autres routeurs ou end devices de se joindre au réseau.

End device : c'est une terminaison du réseau. Un end device peut communiquer avec le coordinateur ou un des routeurs du réseau. Il économise de l'énergie en entrant temporairement dans un mode veille.

Processus de communication entre les modules XBee :

Les modules XBee envoient et reçoivent des données par liaison radio. Ils assurent uniquement le transfert de données ; ils ne peuvent pas modifier les données à envoyer ou reçues. Chaque module XBee est en mesure de communiquer avec un dispositif intelligent tel qu'un ordinateur ou un microcontrôleur via une interface série (cf. Figure A-4).

Communication radio : elle concerne l'échange de données entre les modules XBee. Ces derniers agissent comme des dispositifs de radiofréquence (RF). Chaque XBee est caractérisé par un ensemble de paramètres.

[18] De l'anglais « Open Systems Interconnection » : modèle conceptuel qui caractérise et normalise les fonctions de communication d'un système de télécommunication ou informatique sans tenir compte de sa structure interne et de sa technologie.

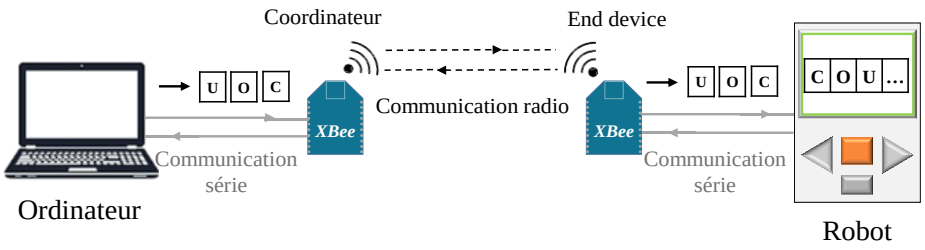


Figure A-4 Transmission de données dans processus de communication XBee

- **Adressage :** chaque module XBee est caractérisé par un ensemble d'adresses différentes, chacune ayant une fonction spécifique. L'adresse 64-bit permet de distinguer chaque XBee des autres. Cette adresse (également appelée MAC) est attribuée à Digi par l'IEEE et est garantie être unique. Elle est identifiée à partir de la combinaison des paramètres Serial Number High (SH) et Serial Number Low (SL). La partie SH est généralement identique pour tous les XBee (0013A200), elle identifie les XBee Digi et la partie SL est différente pour chaque module XBee. L'adresse 16-bit est une adresse réseau affectée à un XBee lorsqu'il se connecte à un réseau Zigbee. La valeur de cette adresse est identifiée par le paramètre d'adresse réseau 16 bits (MY). L'identificateur de nœud (NI) permet d'adresser chaque module XBee avec un nom.

- **Adresse PAN :** les réseaux Zigbee sont appelés réseaux personnel ou PAN. Chaque réseau est défini par un identifiant PAN unique. Cet identifiant est commun à tous les modules XBee du même réseau. La valeur du réseau personnel peut être définie via le paramètre PAN ID (ID).

- **Canaux :** pour que les modules XBee d'un même réseau puissent communiquer, ils doivent opérer sur la même radio fréquence. Le canal sur lequel un module XBee fonctionne est déterminé à partir du paramètre Operating Channel (CH).

Communication série : l'interaction entre les modules XBee et un dispositif intelligent peut se faire selon deux modes de fonctionnement différents : mode AT (Transparent Mode) et mode API (Application Programming Interface).

- **Mode AT :** avec ce mode, le module XBee transmet les données exactement comme il les reçoit. Toutes les données reçues via l'entrée série par le module sont transmises directement (sans modification) par ondes radio au module XBee de réception. Lorsque celui-ci les reçoit, il les envoie via l'interface série au dispositif intelligent exactement telles qu'il les a reçues. En fait, la communication entre les modules est transparente, c'est une liaison presque directe. Ce mode de fonctionnement permet de réaliser une

simple transmission et réception des données communiquées en série. Pour communiquer en mode AT, l'adresse du destinataire doit être préalablement configurée en affectant les valeurs SH et SL du destinataire aux paramètres DH et DL du module de réception et vice versa.

- **Mode API :** avec ce mode, les données sont encapsulées avec les informations nécessaires (telles que l'adresse de destination) et communiquées par paquets (communément appelés API frames). En outre, le nœud de réception reçoit le paquet avec toutes les informations qu'il contient. Ce mode de communication permet de recevoir des données à partir de plusieurs modules XBee et de contrôler à distance plusieurs appareils. Dans ce sens, le mode API fournit une interface structurée dans laquelle les données sont communiquées par l'interface série sous forme de paquets organisés et dans un ordre déterminé. Ce mode offre une meilleure flexibilité et permet par exemple de créer un paquet contenant des informations importantes, telles que l'adresse de destination. Ensuite, à la réception du paquet, il est possible d'en extraire par exemple l'adresse source des données.

Configuration des modules XBee : la configuration des modules XBee est réalisée à l'aide du logiciel XCTU. Ce logiciel permet d'interagir avec les modules Digi RF via une interface graphique. Il comprend un ensemble d'outils qui facilitent la configuration et le test des modules XBee. XCTU offre une vue graphique du réseau de communication établi par les différents XBee connectés (nœuds du réseau).

Afin de réaliser l'architecture souhaitée, trois modules XBee sont utilisés. Un XBee est branché à l'ordinateur superviseur et deux autres aux robots. Les robots doivent envoyer et recevoir un ensemble de données de la part de l'ordinateur. Ainsi, l'ordinateur doit pouvoir identifier le destinataire de chaque ensemble de données à partir de l'adresse MAC source de chaque paquet de données reçu.

Le module XBee de chaque robot est configuré en end device Zigbee-AT-21A7 pour assurer une communication simple avec l'ordinateur dans un environnement restreint. De plus, le module XBee de l'ordinateur est configuré en coordinateur Zigbee- API-21A7 pour recevoir et transmettre des messages aux deux robots. Ce type de configuration inclut dans la structure de trame la source du message, ce qui permet d'identifier facilement l'origine des paquets de message reçus par les robots. De plus, cette configuration permet de gérer la transmission de données vers les deux robots sans avoir à configurer préalablement leur adresse.

La vue réseau du XCTU permet de visualiser la topologie et les interconnections du réseau formé par les modules robots (end devices) et le module ordinateur (coordinateur). Le résultat est illustré sur la Figure A-5.

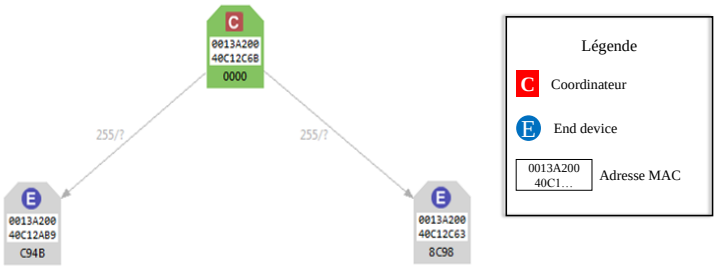


Figure A-5 Réseau établi par les trois modules XBee

Afin de tester la fonctionnalité du réseau de communication établi par les XBee configurés, des tests sont réalisés sous XCTU. D'abord, sur la transmission d'un message du coordinateur vers les deux end devices. Ensuite, sur la transmission d'un autre message de chaque end device vers le coordinateur. Dans les deux cas, la réception du message par le récepteur est vérifiée.

La trame comprend un certain nombre d'informations dont un délimiteur pour signaler le début des informations de la trame et l'adresse de destination (cf. Figure A-6).

Le « frame type » correspond au registre utilisé lors de l'envoi du message. L'adresse de destination 64 bits est définie pour le test à FFFF afin de pouvoir envoyer le message du coordinateur en Broadcast (le message est envoyé à tous les nœuds du même réseau dans ce test). Le même message est alors reçu par les deux end devices (NXT 1 et NXT2).

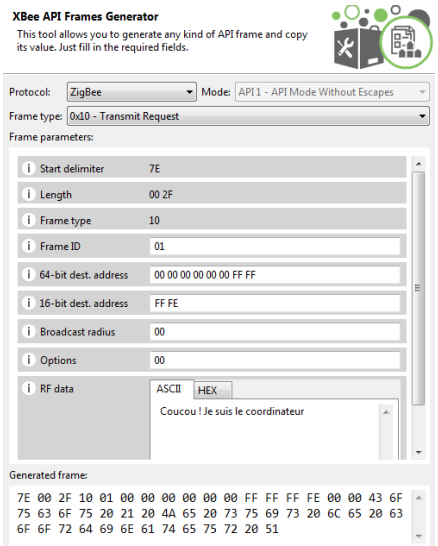


Figure A-6 Création de la trame de données à envoyer par le coordinateur

Il est à remarquer à partir de la Figure A-7 et Figure A-8 que le paquet transmis par les end devices NXT1 et NXT2 à l'ordinateur (XCTU) comprend uniquement le message reçu du coordinateur. Cela est dû au fait que le fonctionnement de la communication série entre les end devices (NXT1 et NXT2) et l'ordinateur (XCTU) soit configuré en mode AT.

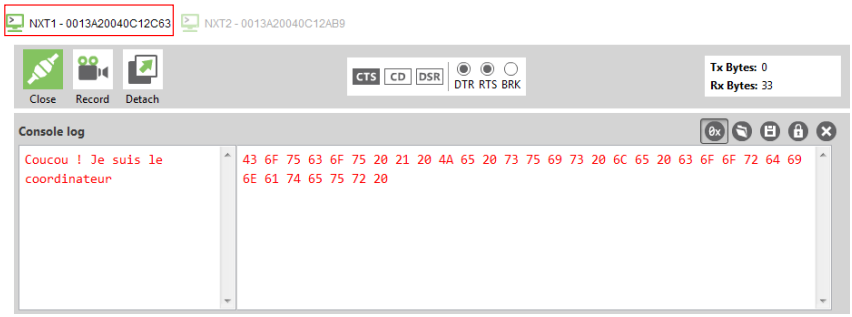


Figure A-7 Réception du message envoyé à XBee NXT1 par le coordinateur

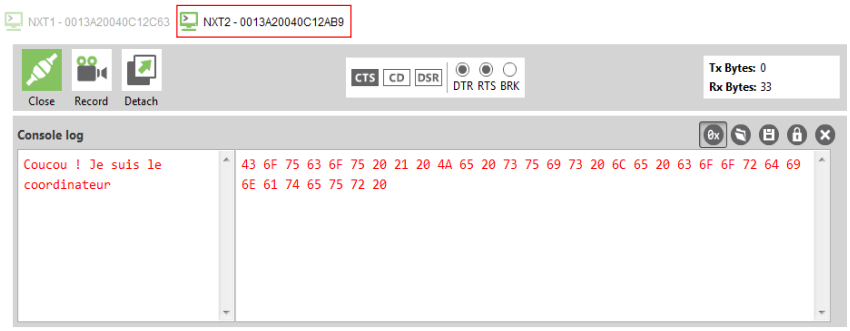


Figure A-8 Réception du message envoyé à XBee NXT2 par le coordinateur

Les paquets de messages (packet_0 et packet_1) comprennent uniquement le message à envoyer au coordinateur car les modules NXT1 et NXT2 sont en mode AT (cf. Figure A-9 et Figure A-10).

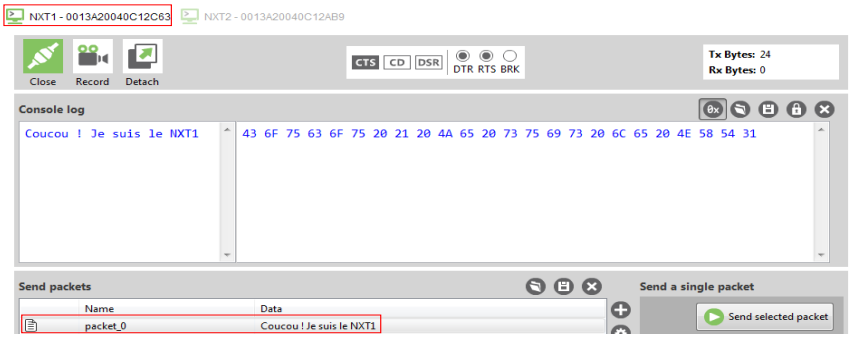


Figure A-9 Message de NXT1 à envoyer au coordinateur

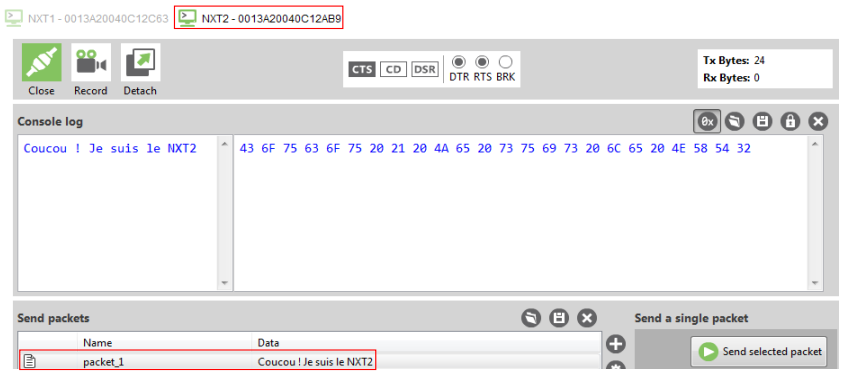


Figure A-10 Message de NXT2 à envoyer au coordinateur

À la réception, le coordinateur reçoit le message envoyé par chacun des end devices et donne accès à plus d'informations concernant les messages reçus, par exemple l'adresse source 64 bits de chaque paquet de message (cf. Figure A-11 et Figure A-12). Ceci revient au fait que le coordinateur soit configuré en mode de communication série API. À partir des résultats des tests menés, on constate que la transmission de données entre les différents XBee est réussie. Cette configuration sous XCTU semble alors permettre d'établir une communication radio fonctionnelle entre l'ordinateur et les deux robots.

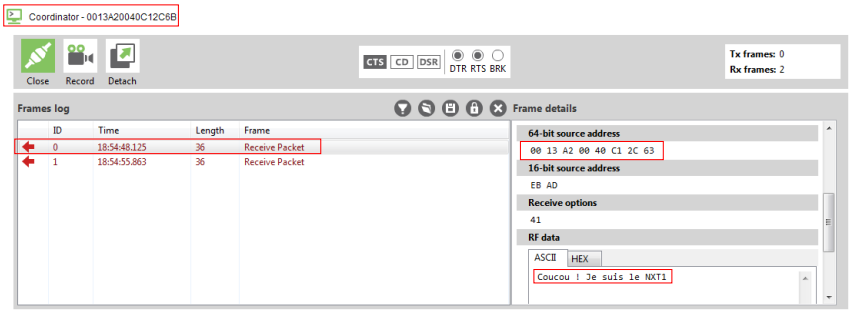


Figure A-11 Message du NXT1 reçu par le coordinateur

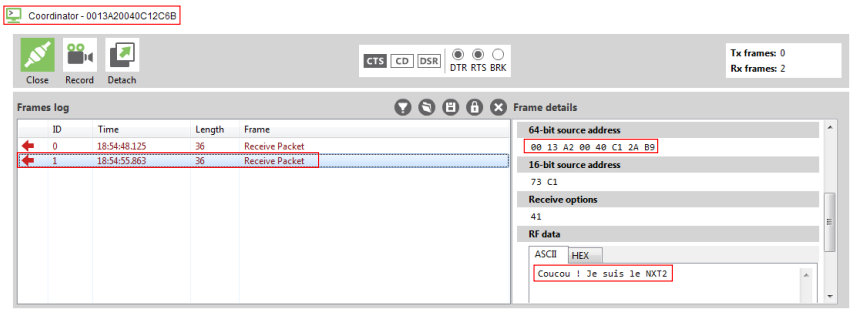


Figure A-12 Message du NXT2 reçu par le coordinateur

Envoi et réception de données entre le robot et l'ordinateur :

Les données à envoyer sont condensées au maximum dans un paquet. En effet, l'envoi

d'un seul paquet contenant toutes les données est plus léger et rapide que l'envoi de plusieurs paquets séparés. Cela est dû aux octets d'informations supplémentaires ajoutées dans chaque paquet envoyé et au temps nécessaire pour leur traitement. Ces informations concernent par exemple l'adresse de l'expéditeur et le type du paquet envoyé. Ensuite, afin de réduire au maximum la taille du paquet, il est capital d'utiliser le plus efficacement possible chaque bit disponible. La taille d'un paquet étant nécessairement un multiple d'un octet (8 bits), il est essentiel d'optimiser au maximum la mémoire utilisée afin de réduire le nombre d'octets du paquet final. À titre d'exemple, pour l'envoi de deux mots de quatre bits, les mots sont compactés dans un même octet plutôt que d'utiliser un octet pour chaque mot. Á la réception, les données sont extraites au bit près dans chaque mot.

Dans l'exemple suivant (cf. Figure A-13 et Figure A-14), les données sont stockées dans les variables : PosX (codée sur 10 bits), PosY (codée sur 9 bits), Psi (codée sur 10 bits), Etat (codée sur 3 bits), Obstacle (codée sur 3 bits) et ObstacleOrient (codée sur 3 bits). Toutes ces données sont alors stockées et envoyées dans un seul paquet de 5 octets au lieu de 6 séparés de différentes tailles. Le programme utilise les opérateurs de manipulation de bits (masque, ET « & », OU « | », décalage à gauche « << » et décalage à droite « >> »).

```
initialisePacking(); // Intialiser le packet

byte bArr[5] = {0, 0, 0, 0, 0};   // Définir un tableau d'octets
bArr[0] = (PosX) >> 2;      // Les 8 derniers bits de PosX

bArr[1] = ((PosX & 3) << 6) // Les 2 premiers bits de PosX
| ((PosY) >> 3);            // Les 6 derniers bits de PosY

bArr[2] = ((PosY & 7) << 5) // Les 3 premiers bits de PosY
| ((Psi & 1023) >> 5);      // Les 5 derniers bits de Psi

bArr[3] = ((Psi & 31) << 3); // Les 5 premiers bits de Psi

bArr[4] = ((Etat & 3) << 6)    // Les 3 bits de Etat
| ((Obstacle & 3) << 4)        // Les 3 bits de Obstacle
| ((OstacleOrient & 3) << 2); // Les 3 bits de ObstacleOrient

test = ( (msg = packBytes(bArr[0], 5)) != 0 ); // Créer un packet du tableau
                                               // d'octets à envoyer
}
if ( test )
{
transmitPackedMessage(ADDR); // Envoyer le packet
                             // à l'adresse du destinaire
}
else
{
nxtScrollText("Pb envoi messsage XBee %d", msg); // Signaliser un problème
                                                 // d'envoi du message
}
```

Figure A-13 Transmission de données par un robot (sous RobotC) vers l'ordinateur. ADDR correspond à l'adresse du destinataire (le coordinateur)

```
PosX = (dataPacket->data[7] << 2) | (dataPacket->data[8] >> 6);
PosY = ((dataPacket->data[8] & 63) << 3) | (dataPacket->data[9] >> 5);
Psi = (((dataPacket->data[9] & 31) << 5) | (dataPacket->data[10] >> 3)) - 360;
Etat = (dataPacket->data[11] >> 6);
Obstacle = (dataPacket->data[11] & 63) >> 4;
ObstacleOrient = (dataPacket->data[11] & 15) >> 2;
F_Robot(NumRobot, PosX, PosY, Psi, Etat, Obstacle, ObstacleOrient);
```

Figure A-14 Réception des données par l'ordinateur (sous visual C++) en fonction de l'adresse source (NumRobot). Les données sont récupérées à partir du 7ème octet (data[7]). Les octets précédents sont réservés pour l'entête (informations supplémentaires ajoutées au message)

Annexe D
Conditions expérimentales

La figure A-15 représente l'interface de supervision utilisée pour la condition expérimentale « WithInfo ». Dans chaque secteur, un LoA est proposé et justifié par le nombre de victimes et dangers à trouver, et par la densité d'obstacle dans le secteur (le critère de visibilité n'a pas été considéré dans l'étude). Dans la condition « WithoutInfo » LoA sont proposés sans justification (cf. Figure A-16).

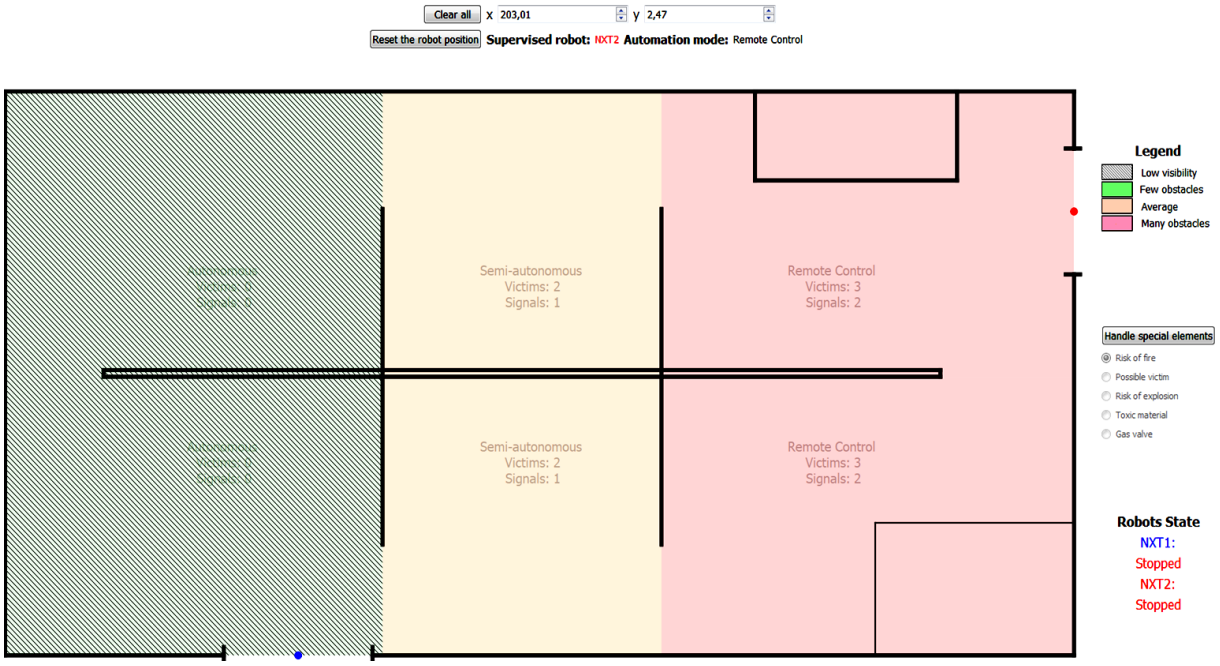


Figure A-15 Interface tactique de la condition expérimentale « WithInfo »

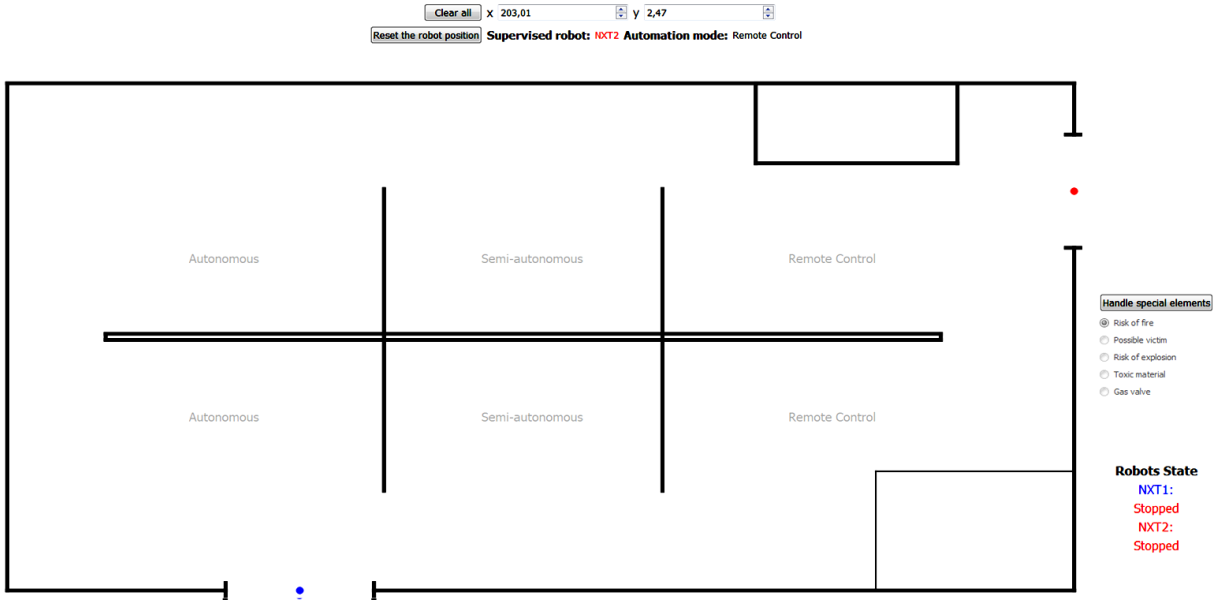


Figure A-16 Interface tactique de la condition expérimentale « WithoutInfo »

Annexe E
Questionnaire basé sur le modèle de coopération homme-robots dans le cadre de la gestion de crise chez les pompiers

Les questions suivantes concernent le savoir-faire des robots

1. Les robots ont-ils eu une bonne perception de la situation ? (pour tous les niveaux d'automatisation)

   (Pas du tout) _____ **(Tout à fait)**

2. Au niveau 2, les robots ont-ils bien analysé la situation ?

   (Pas du tout) _____ **(Tout à fait)**

3. Au niveau 3, les robots ont-ils bien analysé la situation ?

   (Pas du tout) _____ **(Tout à fait)**

4. Au niveau 2, les robots ont-ils su prendre la bonne décision ?

   (Pas du tout) _____ **(Tout à fait)**

5. Au niveau 3, les robots ont-ils su prendre la bonne décision ?

   (Pas du tout) _____ **(Tout à fait)**

6. Au niveau 2, les robots ont-ils bien agit ?

   (Pas du tout) _____ **(Tout à fait)**

7. Au niveau 3, les robots ont-ils bien agit ?

   (Pas du tout) _____ **(Tout à fait)**

Les questions suivantes concernent le savoir-coopérer des robots.

8. Les robots ont-ils bien communiqué et envoyé les informations sur l'environnement et leur état ?

   (Pas du tout) _____ **(Tout à fait)**

9. Les robots vous ont-ils prévenu lors d'une interférence ?

   (Pas du tout) _____ **(Tout à fait)**

10. Les robots ont-ils bien géré cette interférence ?

    (Pas du tout) _____ **(Tout à fait)**

Les questions suivantes concernent votre savoir-faire du niveau opérationnel durant l'expérimentation.

11. Avez-vous bien analysé la situation ?

(Pas du tout) _____ **(Tout à fait)**

12. Avez-vous réussi à prendre les bonnes décisions ?

(Pas du tout) _____ **(Tout à fait)**

13. Avez-vous réussi à faire les bonnes actions ?

(Pas du tout) _____ **(Tout à fait)**

Les questions suivantes concernent votre savoir-coopérer avec le robot durant l'expérimentation.

14. Avez-vous réussi à bien utiliser les informations envoyées par les deux robots ?

(Pas du tout) _____ **(Tout à fait)**

15. Avez-vous réussi à détecter les interférences (conflit avec la décision/action des robots) ?

(Pas du tout) _____ **(Tout à fait)**

16. Avez-vous réussi à gérer ces interférences (conflit avec la décision/action des robots) ?

(Pas du tout) _____ **(Tout à fait)**

17. Avez-vous réussi à changer de commande ?

(Pas du tout) _____ **(Tout à fait)**

Les questions suivantes concernent votre savoir-faire du niveau tactique.

18. Avez-vous été capable de bien analyser les changements dans la situation du niveau opérationnel ?

(Pas du tout) _____ **(Tout à fait)**

19. Pensez-vous avoir pris les bonnes décisions pour atteindre les objectifs ?

(Pas du tout) _____ **(Tout à fait)**

20. Pensez-vous avoir mis à jour le plan au bon moment ?

(Pas du tout) _____ **(Tout à fait)**

Les questions suivantes concernent votre savoir-coopérer du niveau tactique.

21. Pensez-vous avoir changé le niveau d'automatisation au bon moment ?

(Pas du tout) ——————————————————— **(Tout à fait)**

22. Pensez-vous avoir souvent fait le bon choix du niveau d'automatisation ?

(Pas du tout) ——————————————————— **(Tout à fait)**

Annexe F
Détails techniques sur l'implémentation du BCI

La densité spectrale de puissance (PSD) est estimée pendant la dernière seconde dans la bande passante 4-48 Hz avec une résolution de 2 Hz (Millan et *al*., 2004). Ces caractéristiques de la PSD sont calculées toutes les 62,5 ms (soit 16 fois par seconde). Ce calcul est basé sur la méthode de Welch[19] avec 5 fenêtres de Hanning superposées (25%) de 500 ms. Puis, les caractéristiques qui reflètent au mieux la tâche de l'IM de l'utilisateur sont sélectionnées à l'aide d'une analyse de variabilité canonique (CVA). Cette dernière permet de choisir les caractéristiques les plus séparées et les plus stables entre les différentes tâches (Galan et *al*., 2007).

Après cela, un classifieur Gaussien est formé en utilisant ces caractéristiques. En accord avec la littérature sur le contrôle moteur, ces caractéristiques sont généralement situées dans la mu-bande (~ 8-13 Hz). Enfin, les sorties instantanées du classifieur sont accumulées à l'aide d'une méthode de lissage exponentiel (Perdikis, Bayati, & Leeb, 2011).

[19] Méthode d'estimation spectrale proposée par Peter D. Welch en 1967

Annexe G
Questionnaire basé sur le modèle de coppération homme-robot-BCI dans le cadre du hadicap

Questions more related to how the user perceives the robot and the BCI know-how

---

To what extent do you think the robot is able to perceive the situation?

	1	2	3	4	5	6	7	
Not at all	◯	◯	◯	◯	◯	◯	◯	Absolutely

To what extent do you think the BCI is able to perceive your brain signals?

	1	2	3	4	5	6	7	
Not at all	◯	◯	◯	◯	◯	◯	◯	Absolutely

To what extent do you think the robot is able to analyze the situation?

	1	2	3	4	5	6	7	
Not at all	◯	◯	◯	◯	◯	◯	◯	Absolutely

To what extent do you think the BCI is able to analyse your intention?

	1	2	3	4	5	6	7	
Not at all	◯	◯	◯	◯	◯	◯	◯	Absolutely

To what extent do you think the robot is able to make a good decision?

	1	2	3	4	5	6	7	
Not at all	◯	◯	◯	◯	◯	◯	◯	Absolutely

To what extent do you think the robot is able to do the action correctly?

	1	2	3	4	5	6	7	
Not at all	◯	◯	◯	◯	◯	◯	◯	Absolutely

Questions more related to how the user perceives the robot and BCI know-how-to-cooperate

To what extent do you think you are able to have information about the robot?

	1	2	3	4	5	6	7	
Not at all	◯	◯	◯	◯	◯	◯	◯	Absolutely

To what extent do you think you are able to have information about the BCI?

	1	2	3	4	5	6	7	
Not at all	◯	◯	◯	◯	◯	◯	◯	Absolutely

To what extent do you think you are able to detect conflict with the robot (decision, action…)?

	1	2	3	4	5	6	7	
Not at all	◯	◯	◯	◯	◯	◯	◯	Absolutely

To what extent do you think you are able to detect conflict with the BCI (decision, action…)?

	1	2	3	4	5	6	7	
Not at all	◯	◯	◯	◯	◯	◯	◯	Absolutely

To what extent do you think you are able to manage such conflict with the robot?

	1	2	3	4	5	6	7	
Not at all	◯	◯	◯	◯	◯	◯	◯	Absolutely

To what extent do you think you are able to manage such conflict with the BCI?

	1	2	3	4	5	6	7	
Not at all	◯	◯	◯	◯	◯	◯	◯	Absolutely

To what extent do you feel in control of the robot?

	1	2	3	4	5	6	7	
Not at all	◯	◯	◯	◯	◯	◯	◯	Absolutely

To what extent do you feel in control of the BCI?

1	2	3	4	5	6	7		
Not at all	◯	◯	◯	◯	◯	◯	◯	Absolutely

Questions more related to how the robot and the BCI perceive the human know-how

---

To what extent do you think the robot is able to evaluate your decision making?

	1	2	3	4	5	6	7	
Not at all	◯	◯	◯	◯	◯	◯	◯	Absoluetly

To what extent do you think the BCI is able to evaluate your decision making?

	1	2	3	4	5	6	7	
Not at all	◯	◯	◯	◯	◯	◯	◯	Absoluetly

Questions more related to how the robot and the BCI perceive the human know-how-to-cooperate

---

To what extent do you think the robot is able to detect conflict between its decision and your decision?

	1	2	3	4	5	6	7	
Not at all	◯	◯	◯	◯	◯	◯	◯	Absoluetly

To what extent do you think the BCI is able to detect conflict between its decision and your decision?

	1	2	3	4	5	6	7	
Not at all	◯	◯	◯	◯	◯	◯	◯	Absoluetly

To what extent do you think the robot is able to manage the conflict?

	1	2	3	4	5	6	7	
Not at all	◯	◯	◯	◯	◯	◯	◯	Absoluetly

To what extent do you think the BCI is able to manage the conflict?

	1	2	3	4	5	6	7	
Not at all	◯	◯	◯	◯	◯	◯	◯	Absoluetly

To what extent do you think the robot is able to manage authority?

1	2	3	4	5	6	7	
Not at all	◯	◯	◯	◯	◯	◯	◯ Absoluetly

To what extent do you think the BCI is able to manage authority?

1	2	3	4	5	6	7	
Not at all	◯	◯	◯	◯	◯	◯	◯ Absoluetly

Références

Aricò, P., Borghini, G., Di Flumeri, G., Colosimo, A., Bonelli, S., Golfetti, A., … Babiloni, F. (2016). Adaptive Automation Triggered by EEG-Based Mental Workload Index : A Passive Brain-Computer Interface Application in Realistic Air Traffic Control Environment. *Frontiers in Human Neuroscience*, *10*, 539.

Asimov, I. (1941). *Liar!*. *Astounding Science Fiction*. Cambridge University Press, 1977.

Attia, R., Orjuela, R., & Basset, M. (2014). Combined longitudinal and lateral control for automated vehicle guidance. *Vehicle System Dynamics*, *52*(2), 261‑279.

Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. In *Analysis, Design and Evaluation of Man–Machine Systems* (p. 129‑135). Elsevier.

Baker, M., Casey, R., Keyes, B., & Yanco, H. A. (2004). Improved interfaces for human-robot interaction in urban search and rescue. *2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE Cat. No.04CH37583)*, *3*, 2960 ‑ 2965. https://doi.org/10.1109/ICSMC.2004.1400783

Balfe, N., Sharples, S., & Wilson, J. R. (2015). Impact of automation : Measurement of performance, workload and behaviour in a complex control environment. *Applied Ergonomics*, *47*, 52‑64.

Beer, J. M., Fisk, A. D., & Rogers, W. A. (2014). Toward a Framework for Levels of Robot Autonomy in Human-Robot Interaction. *Journal of Human-Robot Interaction*, *3*(2), 74.

Beer, J. M., Prakash, A., Mitzner, T. L., & Rogers, W. A. (2011). *Understanding robot acceptance*. Georgia Institute of Technology.

Beggiato, M., Hartwich, F., Schleinitz, K., Krems, J., Othersen, I., & Petermann-Stock, I. (2015). What would drivers like to know during automated driving ? Information needs at different levels of automation. *7. Tagung Fahrerassistenzsysteme*.

Billings, C. E. (1996). *Human-centered aviation automation : Principles and guidelines*.

Billings, C. E. (1997). *Aviation Automation : The Search for a Human-Centred Approach* (Lawrence Erlbaum Associates, Inc). Mahwah, New Jersey.

Blankertz, B., Tangermann, M., Vidaurre, C., Fazli, S., Sannelli, C., Haufe, S., … Muller, K.-R. (2010). The Berlin brain-computer interface : Non-medical uses of BCI technology. *Frontiers in Neuroscience*, *4*, 198.

Boy, G. A. (1998). *Cognitive Function Analysis* (Vol. 2). Greenwood Publishing Group.

Boy, G. A. (2011). A Human-Centred Design Approach. In *The handbook of Human-Machine Interaction, A Human-Centred Design Approach* (p. 1‑20). Ashgate, Farnham.

Brouwer, A.-M., Hogervorst, M. A., Van Erp, J. B., Heffelaar, T., Zimmerman, P. H., & Oostenveld, R. (2012). Estimating workload using EEG spectral power and ERPs in the n-back task. *Journal of neural engineering*, *9*(4), 045008.

Cacciabue, P. C. (2004). Elements of Human-Machine Systems. In *Guide to Applying Human Factors Methods* (p. 9‑47).

Calhoun, G. L., Ruff, H. A., Spriggs, S., & Murray, C. (2012). Tailored Performance-based Adaptive Levels of Automation. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, *56(1)*, 413‑417.

Capek, K. (2004). *RUR (Rossum's universal robots)*. Penguin.

Carlson, J., & Murphy, R. R. (2003). Reliability analysis of mobile robots. *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.03CH37422)*, *1*, 274 ‑ 281. https://doi.org/10.1109/ROBOT.2003.1241608

Chauvin, C., & Hoc, J.-M. (2014). Integration of ergonomics in the design of human-machine systems. In P. Millot, *Designing Human-Machine Cooperation Systems* (p. 43‑81). John Wiley & Sons.

Chavarriaga, R., Sobolewski, A., & Millán, J. del R. (2014). Errare machinale est : The use of error-related potentials in brain-machine interfaces. *Frontiers in Neuroscience*, *8*, 208.

Chen, J. Y. C., & Barnes, M. J. (2012). Supervisory Control of Multiple Robots : Effects of Imperfect Automation and Individual Differences. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *54*(2), 157‑174. https://doi.org/10.1177/0018720811435843

Clough, B. T. (2002). *Metrics, schmetrics ! How the heck do you determine a UAV's autonomy anyway*. Air Force Research Lab Wright-Patterson AFB OH.

Dadashi, N., Stedmon, A. W., & Pridmore, T. P. (2013). *Semi-automated CCTV surveillance : The effects of system confidence, system accuracy and task complexity on operator vigilance, reliance and workload*. *44*(5), 730‑738.

de Tjerk, E. G., Henryk, F. R. A., & Neerincx, M. A. (2010). Adaptive Automation Based on an Object-Oriented Task Model : Implementation and Evaluation in a Realistic C2 Environment. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, *4*(2), 152‑182.

del R. Millan, J., Renkens, F., Mourino, J., & Gerstner, W. (2004). Noninvasive Brain-Actuated Control of a Mobile Robot by Human EEG. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, *51*(6), 1026‑1033. https://doi.org/10.1109/TBME.2004.827086

Dhillon, B. S. (2012). *Robot reliability and safety*. Springer Science & Business Media.

Direction de la Sécurité Civile et de la Gestion des Risques. (2017). *GUIDE D'ELABORATION DES PLANS ETABLISSEMENTS REPERTORIES (ETARE)* [Guide].

Draper, J. V. (1995). Teleoperators for advanced manufacturing : Applications and human factors challenges. *International Journal of Human Factors in Manufacturing*, *5*(1), 53–85.

Durso, F. T., & Sethumadhavan, A. (2008). Situation Awareness : Understanding Dynamic Environments. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *50*(3), 442‑448.

Endsley, M. R. (1995). Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *37*(1), 32‑64.

Endsley, M. R. (2006). Situation Awareness. In G. Salvendy (Éd.), *Handbook of Human Factors and Ergonomics* (p. 528‑542). Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.

Endsley, M. R. (2016). *Designing for situation awareness : An approach to user-centered design*. CRC press.

Endsley, M. R. (2017). Direct measurement of situation awareness : Validity and use of SAGAT. *Routledge*, 129‑156.

Endsley, M. R., & Kaber, D. B. (1999). Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Ergonomics*, *42*(3), 462–492.

Endsley, M. R., & Kiris, E. O. (1995). The Out-of-the-Loop Performance Problem and Level of Control in Automation. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *37*(2), 381‑394.

Fereidunian, A., Lucas, C., Lesani, H., Lehtonen, M., & Nordman, M. (2007). Challenges in implementation of human-automation interaction models. *Control & Automation, 2007. MED'07. Mediterranean Conference on*, 1‑6.

Fitts, P. M., Viteles, M. S., Barr, N. L., Brimhall, D. R., Finch, G., Gardner, E., … Stevens, S. S. (1951). *Human engineering for an effective air navigation and traffic-control system* [Tech. Rep.]. Ohio State University Research Foundation Columbus.

Frohm, J., Lindström, V., Winroth, M., & Stahre, J. (2008). Levels of automation in manufacturing. *Ergonomia*.

Galan, F., Ferrez, Pierre. W., Oliva, F., Guardia, J., & Millan, J. del R. (2007). Feature Extraction for Multi-class BCI using Canonical Variates Analysis. *2007 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing*, 1‑6. https://doi.org/10.1109/WISP.2007.4447615

Gentner, D. (2001). Mental Models, Psychology of,. In *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences* (p. 9683‑9687). Pergamon: Neil J. Smelser, Paul B. Baltes,.

Giacomin, J. (2014). What Is Human Centred Design? *The Design Journal*, p. 606--623.

Giele, T. R. A., Mioch, T., Neerincx, M., & Meyer, J. -j. (2015). Dynamic Task Allocation for Human-Robot Teams. *ICAART (1)*, *1*, 117‑124.

Gombolay, M., Bair, A., Huang, C., & Shah, J. (2017). Computational design of mixed-initiative human–robot teaming that considers human factors : Situational awareness, workload, and workflow preferences. *The International Journal of Robotics Research*, *36*(5‑7), 597‑617. https://doi.org/10.1177/0278364916688255

Goodrich, M. A., & Olsen, D. R. (2003). Seven principles of efficient human robot interaction. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 3942‑3948. Washington, DC, USA: IEEE.

Gorman, J. C., Cooke, N. J., & Winner, J. L. (2006). Measuring team situation awareness in decentralized command and control environments. *Ergonomics*, *49*(12‑13), 1312‑1325.

Green, T. R. G., & Hoc, J.-M. (1991). WHAT IS COGNITIVE ERGONOMICS? *Le Travail Humain*, *54*(4), 291‑304.

Gusmini, M. (2001). *Terminologie de la maintenance* (p. 59).

Habib, L., Pacaux-Lemoine, M. P., & Millot, P. (2017). A method for designing levels of automation based on a human-machine cooperation model. *IFAC-PapersOnLine*, *50*(1), 1372‑1377.

Hancock, P. A., & Scallen, S. F. (1996). The Future of Function Allocation. *Ergonomics in Design: The Quarterly of Human Factors Applications*, *4*(4), 24‑29.

Hart, S. G. (2006). NASA-task load index (NASA-TLX); 20 years later. *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*, *50*, 904–908. Sage Publications.

Hoc, J.-M., & Lemoine, M.-P. (1998). Cognitive evaluation of human-human and human-machine cooperation modes in air traffic control. *The International Journal of Aviation Psychology*, *8*(1), 1–32.

Hollnagel, E. (1991). Cognitive ergonomics and the reliability of cognition. *Le Travail Humain*, *54*(4), 305‑321.

Horrey, W. J., & Wickens, C. D. (2001). Supporting Situation Assessment Through Attention Guidance : A Cost-Benefit and Depth of Processing Analysis. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, *45*(4), 316‑320.

Horst, J. van der, & Noble, J. (2010). Distributed and Centralized Task Allocation : When and Where to Use Them. *2010 Fourth IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems Workshop*, 1‑8. Budapest, TBD, Hungary: IEEE.

Inagaki, T. (2003). Adaptive Automation : Sharing and Trading of Control. In *Handbook of cognitive task design* (p. 171‑194). CRC Press.

Itoh, M., & Pacaux-Lemoine, M. P. (2018). Trust View from the Human-Machine Cooperation Framework. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 3203‑3208. Miyazaki, Japan.

Itoh, Makoto, & Pacaux-Lemoine, M.-P. (2018). Trust View from the Human-Machine Cooperation Framework. *2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 3213‑3218. IEEE.

Johnson, G., & Wilson, J. (1988). Future directions and research issues for ergonomics and advanced manufacturing technology (AMT). *Applied ergonomics*, p. 3‑8.

Johnson, M., Bradshaw, J. M., Feltovich, P. J., Hoffman, R. R., Jonker, C., Riemsdijk, B. v, & Sierhuis, M. (2011). Beyond Cooperative Robotics : The Central Role of Interdependence in Coactive Design. *IEEE Intelligent Systems*, *26*(3), 81‑88. https://doi.org/10.1109/MIS.2011.47

Johnson, R., Leen, M., & Goldberg, D. (2007). *Testing Adaptive Levels of Automation (ALOA) for UAV Supervisory Control:* Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center.

Jordan, N. (1963). Allocation of functions between man and machines in automated systems. *Journal of applied psychology*, p. 161.

Kaber, D. B. (2018). Issues in Human–Automation Interaction Modeling : Presumptive Aspects of Frameworks of Types and Levels of Automation. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, *12*(1), 7‑24. https://doi.org/10.1177/1555343417737203

Kaber, D. B., & Endsley, M. R. (2004). The effects of level of automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, *5*(2), 113‑153.

Kaber, D. B., Riley, J. M., Tan, K.-W., & Endsley, M. R. (2001). On the Design of Adaptive Automation for Complex Systems. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, *5*(1), 37‑57.

Kaber, D. B., Wright, M. C., & Sheik-Nainar, M. A. (2006). Investigation of multi-modal interface features for adaptive automation of a human–robot system. *International Journal of Human-Computer Studies*, *64*(6), 527‑540.

Kidwell, B., Calhoun, G. L., Ruff, H. A., & Parasuraman, R. (2012). Adaptable and Adaptive Automation for Supervisory Control of Multiple Autonomous Vehicles. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, *56*(1), 428‑432.

Kirlik, A. (1993). Modeling Strategic Behavior in Human-Automation Interaction : Why an « Aid » Can (and Should) Go Unused. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *35*(2), 221‑242.

Lee, J. D., & Moray, N. (1992). Trust, control strategies, and allocation of function in human-machine systems. *Ergonomics*, *35*(10), 1243‑1270.

Lee, John D., & See, K. A. (2004). Trust in automation : Designing for appropriate reliance. *Human Factors*, *46*(1), 50‑80.

Leeb, R., Tonin, L., Rohm, M., Desideri, L., Carlson, T., & Millan, J. del R. (2015). Towards Independence : A BCI Telepresence Robot for People With Severe Motor Disabilities. *Proceedings of the IEEE*, *103*(6), 969‑982. https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2419736

Lemoine, M. P. (1998). *Coopération homme-machine dans les procédés complexes : Modèles techniques et cognitifs pour le contrôle du trafic aérien*. Univérsité de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis.

Lemoine, M. P., Debernard, S., Crevits, I., & Millot, P. (1996). Cooperation between humans and machines : First results of an experiment with a multi-level cooperative organisation in air traffic control. *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, *5*(2‑3), 299‑321.

Li, H., Sarter, N., Wickens, C., & Sebok, A. (2013). Supporting Human-Automation Collaboration through Dynamic Function Allocation : The Case of Space Teleoperation. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, *57*, 359‑363. SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA.

Lima, P. F., Pereira, G. C., Mårtensson, J., & Wahlberg, B. (2018). Experimental validation of model predictive control stability for autonomous driving. *Control Engineering Practice*, *81*, 244‑255.

Liu, A., Zhang, W.-A., Yu, L., Yan, H., & Zhang, R. (2018). Formation Control of Multiple Mobile Robots Incorporating an Extended State Observer and Distributed Model Predictive Approach. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, (99), 1‑11.

Marzat, J., Piet-Lahanier, H., & Kahn, A. (2014). Cooperative guidance of LEGO Mindstorms NXT mobile robots. *Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO), 2014 11th International Conference on*, *2*, 605–610. IEEE.

Matta, N., Zeng, X., Pacaux-Lemoine, M.-P., Anceaux, F., Moreau, J.-H., Cahier, J.-P., & Brébion, P. (2016). *Livrable L2 : Spécification des scénarii. Projet SUCRé (Sûreté de fonctionnement et résilience pour la gestion et le contrôle coopératifs des systèmes sociotechniques : Application à la coopération Hommes-Robots en milieu hostile)* [Livrable]. LAMIH.

Mercado, J. E., Rupp, M. A., Chen, J. Y. C., Barnes, M. J., Barber, D., & Procci, K. (2016). Intelligent Agent Transparency in Human–Agent Teaming for Multi-UxV Management. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *58*(3), 401‑415.

Mi, Z.-Q., & Yang, Y. (2013). Human-Robot Interaction in UVs Swarming : A Survey. *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, *10*(2 Part 1), 273.

Michon, J. A. (1985). A Critical View of Driver Behavior Models : What Do We Know, What Should We Do? In *Human Behavior and Traffic Safety* (Evans L., Schwing R.C. (eds), p. 485‑524). Boston, MA: Springer.

Milgram, P., Rastogi, A., & Grodski, J. J. (1995). Telerobotic control using augmented reality. *Robot and Human Communication, 1995. RO-MAN'95 TOKYO, Proceedings., 4th IEEE International Workshop on*, 21–29. IEEE.

Miller, C. A., & Parasuraman, R. (2003). Beyond Levels of Automation : An Architecture for More Flexible Human-Automation Collaboration. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, *47*(1), 182‑186.

Miller, C. A., & Parasuraman, R. (2007). Designing for Flexible Interaction Between Humans and Automation : Delegation Interfaces for Supervisory Control. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *49*(1), 57‑75.

Millot, P. (1988). *Supervision des Procédés Automatisés et Ergonomie*. Présenté à Paris. Paris: HERMES.

Millot, P. (2014a). *Designing Human-Machine Cooperation Systems* (1re éd.). London: ISTE-Wiley.

Millot, P. (2014b). Human-Machine Cooperation and Situation Awareness. In *Designig Human-machine Cooperation Systems*. John Wiley & Sons.

Millot, P. (2015). Situation Awareness : Is the glass half empty or half full? *Cognition, Technology & Work*, *17*(2), 169‑177.

Millot, P., Debernard, S., & Vanderhaegen, F. (2011). Authority and cooperation between humans and machines. *Handbook for Human-Machine Interaction. Ashgate Publishing Ltd, Wey Court East, Union Road, Farnham, Surrey, GU9 7PT, England*, 29.

Millot, P., & Hoc, J.-M. (1997). Human-machine cooperation : Metaphor or possible reality? *European Conference on Cognitive Sciences (ECCS 97), Manchester UK*.

Millot, P., & Lemoine, M.-P. (1998). An attempt for generic concepts toward human-machine cooperation. *Systems, Man, and Cybernetics, 1998. 1998 IEEE International Conference on*, *1*, 1044–1049. IEEE.

Millot, P., & Mandiau, R. (1995). Man-machine cooperative organizations : Formal and pragmatic implementation methods. In J.-M. Hoc, P. C. Cacciabue, & E. Hollnagel (Éd.), *Expertise and technology* (p. 213‑228). L. Erlbaum Associates Inc.

Millot, P., & Pacaux-Lemoine, M.-P. (2013). A common work space for a mutual enrichment of human-machine cooperation and team-situation awareness. *Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems*, *12*, 387–394.

Moray, N., Inagaki, T., & Itoh, M. (2000). Adaptive Automation, Trust, and Self-Confidence in Fault Management of Time-Critical Tasks. *Journal of experimental psychology: Applied*, *6*(1), 44.

Nascimento, T. P., Dórea, C. E. T., & Gonçalves, L. M. G. (2018). Nonlinear model predictive control for trajectory tracking of nonholonomic mobile robots : A modified approach. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, *15*(1), 1729881418760461.

Nguyen, A.-T., Sentouh, C., & Popieul, J.-C. (2018). Sensor Reduction for Driver-Automation Shared Steering Control via an Adaptive Authority Allocation Strategy. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, *23*(1), 5‑16.

Nilsson, R. (2001). *Safety Margins in the Driver*. 59.

Norman, D. A., & Draper, S. W. (1986). *User Centered System Design; New Perspectives on Human-Computer Interaction*. L. Erlbaum Associates Inc.

Olsen, D. R., & Goodrich, M. A. (2003). Metrics for Evaluating Human-Robot Interactions. *Proceedings of PERMIS*, 4.

Onnasch, L., Wickens, C. D., Li, H., & Manzey, D. (2014). Human Performance Consequences of Stages and Levels of Automation : An Integrated Meta-Analysis. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *56*(3), 476 ‑ 488. https://doi.org/10.1177/0018720813501549

Pacaux, M.-P., Godin, S. A. D., Rajaonah, B., Anceaux, F., & Vanderhaegen, F. (2011). Levels of automation and human-machine cooperation : Application to human-robot interaction. *IFAC Proceedings Volumes*, *44*(1), 6484‑6492.

Pacaux-Lemoine, M. P., & Debernard, S. (2000). A common work space to support the air traffic control. *IFAC Proceedings Volumes*, *33*(12), 75‑78.

Pacaux-Lemoine, M.-P. (2014). Human–Machine Cooperation Principles to Support Life-Critical Systems Management. *Risk Management in Life-Critical Systems*, 253–277.

Pacaux-Lemoine, M.-P., Debernard, S., Godin, A., Rajaonah, B., Anceaux, F., & Vanderhaegen, F. (2011). Levels of automation and human-machine cooperation : Application to human-robot interaction. *World Congress*, *18*, 6484–6492.

Pacaux-Lemoine, M.-P., Habib, L., & Carlson, T. (2018). Human-robot cooperation through brain-computer interaction and emulated haptic supports. *2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 1973‑1978. IEEE.

Pacaux-Lemoine, Tartare, G., Habib, L., Koehl, L., & Zeng, X. (2017). Human-robots cooperation through intelligent garment. *2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 1996‑2001. IEEE.

Parasuraman, R., Bahri, T., Deaton, J. E., Morrison, J. G., & Barnes, M. (1992). *Theory and design of adaptive automation in aviation systems*. Catholic Univ of America Washington DC Cognitive Science Lab.

Parasuraman, R., Cosenzo, K. A., & De Visser, E. (2009). Adaptive Automation for Human Supervision of Multiple Uninhabited Vehicles : Effects on Change Detection, Situation Awareness, and Mental Workload. *Military Psychology*, *21*(2), 270‑297.

Parasuraman, R., Galster, S., Squire, P., Furukawa, H., & Miller, C. (2005). A flexible delegation-type interface enhances system performance in human supervision of multiple robots : Empirical studies with RoboFlag. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, *35*(4), 481‑493.

Parasuraman, R., Sheridan, T. B., & Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, *30*(3), 286–297.

Parasuraman, Raja, & Riley, V. (1997). Humans and Automation : Use, Misuse, Disuse, Abuse. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *39*(2), 230‑253.

Parasuraman, Raja, Sheridan, T. B., & Wickens, C. D. (2008). Situation Awareness, Mental Workload, and Trust in Automation : Viable, Empirically Supported Cognitive Engineering Constructs. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, *2*(2), 140‑160.

Parasuraman, Raja, & Wickens, C. D. (2008). Humans : Still Vital After All These Years of Automation. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *50*(3), 511‑520.

Perdikis, S., Bayati, H., & Leeb, R. (2011). *Evidence Accumulation in asynchronous BCI*. *13*(3), 131–132.

Piaget, J. (1965). *Études sociologiques* (Vol. 32). Librairie Droz.

Potter, S. S., & Bressler, J. R. (1989). *Subjective Workload Assessment Technique (SWAT) : A User's Guide*. DTIC Document.

Quevedo, D. E., Aguilera, R. P., & Geyer, T. (2019). Model Predictive Control for Power Electronics Applications. In S. V. Raković & W. S. Levine (Éd.), *Handbook of Model Predictive Control* (p. 551‑580). https://doi.org/10.1007/978-3-319-77489-3_23

Rabardel, P. (2014). *People and technology*. 189.

Rajaonah, B. (2006). *Rôle de la confiance de l'opérateur dans son interaction avec une machine autonome sur la coopération homme-machine*. Paris 8.

Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, *SMC-13*(3), 257‑266.

Renoult, A. (2015). *SERVICE DE PRESSE : Heymann Renoult Associées*. 20.

Riley, J. M., & Endsley, M. R. (2004). The hunt for situation awareness : Human-robot interaction in search and rescue. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, *48*, 693‑697. SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA.

Rogalski, J. (2004). La gestion des crises. In P. Falzon (Éd.), *Ergonomie* (p. 531‑544). Presses Universitaires de France.

Rouse, W. B. (1991). *Design for success : A human-centered approach to designing successful products and systems* (Wiley). New York.

Rouse, W. B., & Rouse, S. H. (1983). *A Framework for Research on Adaptive Decision Aids*. Alphatec Inc Burlington MA.

Ruff, H. A., Narayanan, S., & Draper, M. H. (2002). Human interaction with levels of automation and decision-aid fidelity in the supervisory control of multiple simulated unmanned air vehicles. *Presence: Teleoperators and virtual environments*, *11*(4), 335–351.

Sakamoto, Y., & Kuwana, E. (1993). Toward integrated support of synchronous and asynchronous communication in cooperative work : An empirical study of real group communication. *Proceedings of the conference on Organizational computing systems. ACM*, 90‑97.

Salas, E., Cooke, N. J., & Rosen, M. A. (2008). On Teams, Teamwork, and Team Performance : Discoveries and Developments. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *50*(3), 540‑547.

Salazar-Gomez, A. F., DelPreto, J., Gil, S., Guenther, F. H., & Rus, D. (2017). Correcting robot mistakes in real time using EEG signals. *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 6570‑6577. https://doi.org/10.1109/ICRA.2017.7989777

Sarter, N. B., Woods, D. D., & Billings, C. E. (1997). Automation surprises. *Handbook of Human Factors and Ergonomics*, *2*, 1926‑1943.

Sauer, J., & Chavaillaz, A. (2017). *The use of adaptable automation : Effects of extended skill lay-off and changes in system reliability*. (58), 471‑481.

Schmidt, K., Rasmussen, J., Brehmer, B., & Leplat, J. (1991). Cooperative Work : A Conceptual Framework. *Distributed Decision Making: Cognitive Models for Cooperative Work*, 75‑110.

Scholtz, J., Antonishek, B., & Young, J. (2004). Evaluation of a Human-Robot Interface : Development of a Situational Awareness Methodology. *The Hawaii International Conference on System Sciences*, 9.

Sentouh, C., Nguyen, A.-T., Benloucif, M. A., & Popieul, J.-C. (2018). Driver-Automation Cooperation Oriented Approach for Shared Control of Lane Keeping Assist Systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1‑17.

Shahrdar, S., Menezes, L., & Nojoumian, M. (2019). A Survey on Trust in Autonomous Systems. In K. Arai, S. Kapoor, & R. Bhatia (Éd.), *Intelligent Computing* (Vol. 857, p. 368‑386). https://doi.org/10.1007/978-3-030-01177-2_27

Sheridan, T. B. (2002). *Humans and automation : System design and research issues*. Human Factors and Ergonomics Society.

Sheridan, T. B., & Verplank, W. L. (1978). *Human and computer control of undersea teleoperators*. DTIC Document.

Sperandio, J.-C. (1987). *L'ergonomie du travail mental*. FeniXX.

Steinbauer, G. (2013). A Survey about Faults of Robots Used in RoboCup. In X. Chen, P. Stone, L. E. Sucar, & T. van der Zant (Éd.), *RoboCup 2012 : Robot Soccer World Cup XVI* (Vol. 7500, p. 344‑355). https://doi.org/10.1007/978-3-642-39250-4_31

Vagia, M., Transeth, A. A., & Fjerdingen, S. A. (2016). A literature review on the levels of automation during the years. What are the different taxonomies that have been proposed? *Applied Ergonomics*, *53*, 190‑202.

Wagner, A. R., & Arkin, R. C. (2011). Acting Deceptively : Providing Robots with the Capacity for Deception. *International Journal of Social Robotics*, *3*(1), 5‑26.

Wang, C., Liu, X., Yang, X., Hu, F., Jiang, A., & Yang, C. (2018). Trajectory tracking of an omni-directional wheeled mobile robot using a model predictive control strategy. *Applied Sciences*, *8*(2), 231.

Wickens, C. D., Sebok, A., Li, H., Sarter, N., & Gacy, A. M. (2015). Using modeling and simulation to predict operator performance and automation-induced complacency with robotic automation : A case study and empirical validation. *Human factors*, *57*(6), 959‑975.

Wilson, G. F., & Russell, C. A. (2007). Performance Enhancement in an Uninhabited Air Vehicle Task Using Psychophysiologically Determined Adaptive Aiding. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, *49*(6), 1005‑1018.

Wright, J. L., Chen, J. Y., Quinn, S. A., & Barnes, M. J. (2013). *The effects of level of autonomy on human-agent teaming for multi-robot control and local security maintenance*. ARMY RESEARCH LAB ABERDEEN PROVING GROUND MD.

Yang, J. X., Unhelkar, V. V., Li, K., & Sahah, J. (2017). Evaluating Effects of User Experience and System Transparency on Trust in Automation. *Proceedings of the 2017 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, 408‑416. ACM.

Young, J. E., Hawkins, R., Sharlin, E., & Igarashi, T. (2009). Toward Acceptable Domestic Robots : Applying Insights from Social Psychology. *International Journal of Social Robotics*, *1*(1), 95‑108. https://doi.org/10.1007/s12369-008-0006-y

Zieba, S., Polet, P., Vanderhaegen, F., & Debernard, S. (2010). Principles of adjustable autonomy : A framework for resilient human–machine cooperation. *Cognition, Technology & Work*, *12*(3), 193‑203.