



Faculté de génie
Département de génie électrique et de génie informatique

INTERFACE-OPÉRATEUR À RÉALITÉ ET PERSPECTIVE MIXTES DE
TÉLÉOPÉRATION DE ROBOT MOBILE POUR UNE APPLICATION DE
TÉLÉASSISTANCE

Thèse de doctorat

(Composition du jury)

François Michaud
Patrick Boissy
Sylvain Giroux
Bernard Lefebvre

Daniel LABONTÉ

Sherbrooke (Québec), Canada

mai 2008

IV-1863



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file *Votre référence*
ISBN: 978-0-494-42681-4
Our file *Notre référence*
ISBN: 978-0-494-42681-4

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

RÉSUMÉ

Le vieillissement de la population occasionne une surcharge sur le réseau de la santé, d'où l'intérêt de maintenir à domicile des personnes à risque. Une solution intéressante à ce problème consiste à utiliser des technologies de communication et d'interaction à distance pour offrir des télésoins ou de la télésurveillance et à ces personnes. Notre travail porte plus spécifiquement sur l'utilisation d'un robot mobile téléopéré et équipé d'un équipement de vidéoconférence. La mobilité du robot procure l'avantage de pouvoir évaluer et suivre une personne dans un domicile ou de se positionner de façon appropriée à accomplir.

L'interface-opérateur constitue le cœur d'un système robotique téléopéré afin d'en assurer une utilisation efficace et sécuritaire, deux critères directement affectés par l'expérience des opérateurs du système. Dans les contextes de la télésurveillance ou de télésoins, il faut en fait prendre comme hypothèse que le système sera utilisé par des opérateurs non-spécialistes en robotique (e.g., cliniciens, aidants naturels).

De récentes études en conception d'interface-opérateur ont démontré sommairement que l'intégration de techniques de réalité virtuelle à des images vidéo obtenues d'une caméra montée sur un robot mobile permet d'améliorer les performances de téléopération. Par notre étude, nous désirons pousser plus loin ces pistes de solution en étudiant l'apport de deux configurations d'interface exploitant la réalité virtuelle par rapport à une interface conventionnelle montrant principalement une vue vidéo de l'environnement distant. La première configuration superpose la vue vidéo sur un modèle en trois dimensions (3D) de l'environnement, élargissant l'angle de vue sur l'environnement distant. La seconde utilise en projection un modèle 3D de l'environnement présentant le robot et la vue vidéo selon une perspective exocentrique.

Pour ce faire, nous avons établi une méthodologie expérimentale rigoureuse caractérisant les performances d'un groupe de 37 opérateurs novices par rapport à un expert et par rapport à eux-mêmes, éliminant du coup les influences provenant des capacités du système robotique et de l'environnement. Quatre métriques sont utilisées pour caractériser les performances des opérateurs selon les trois configurations d'interface, menant ainsi à la plus importante étude réalisée jusqu'à maintenant dans ce domaine.

Les résultats montrent que les interfaces-opérateur avec réalité virtuelle améliorent de façon significative les performances des opérateurs novices. Plus spécifiquement, c'est la configuration selon une perspective exocentrique qui semble être la plus appropriée, spécialement chez les opérateurs féminins, les opérateurs de plus de 30 ans ou les opérateurs travaillant moins de 22 heures par semaine sur ordinateur, des caractéristiques qui se trouvent fréquemment pour les opérateurs potentiels du système.

Plusieurs améliorations ont été identifiées suite aux expériences réalisées. Ces améliorations permettront d'obtenir une interface-opérateur plus performante pour conduire des études sur le choix des mécanismes de contrôle (en laboratoire), pour ensuite porter un choix éclairé sur l'interface-opérateur à utiliser afin de mener une étude clinique dans des domiciles réels.

REMERCIEMENTS

L'auteur désire remercier son directeur François Michaud et son co-directeur Patrick Boissy pour leur aide précieuse et encouragements tout au long de ce travail de recherche. Des remerciements vont aussi à Madame Lise Trottier pour ses nombreux conseils et validations des méthodes statistiques utilisées pour l'analyse des données de résultats d'expériences. Le déroulement des nombreux essais de pré-expérimentations et des expériences avec le groupe de novices ont été possibles grâce à l'aide de Richard Cloutier, Marc-André Roux, Dominic Létourneau, Clément Raïevski, Carle Côté et des deux assistants et caméramans, Amélie Masson-Labonté et Rémi Soulière. Un grand merci aux trente-neuf participants qui ont patiemment joué le rôle d'opérateur novice. Enfin, je remercie mon épouse Madeleine pour son aide lors de révisions de textes et pour ses nombreux encouragements tout au long de ce travail ainsi que mes enfants Amélie, Philippe et Isabelle. Je désire remercier aussi ma sœur Monique et mes parents qui m'ont toujours encouragé à persévérer et en particulier mon père Gérard Labonté qui aurait tant aimé poursuivre des études scientifiques.

Cette recherche a été rendue possible grâce au financement de l'Institut de Recherche en Santé du Canada (santé musculo-squelettique et arthrite, subvention 120591), le programme des Chaires de recherche du Canada, le Conseil de recherche en sciences naturelles et génie du Canada, la Fondation canadienne pour l'innovation, le Ministère de l'éducation du Québec et l'Université de Sherbrooke.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	1
1.1	Assistance robotique pour les soins à domicile	3
1.2	Plates-formes robotiques pour l'assistance et la téléprésence	9
1.2.1	<i>Robotique d'assistance</i>	9
1.2.2	<i>Robot de téléprésence</i>	11
1.3	Projet de recherche	15
1.4	Organisation de la thèse	17
2	Étude pilote de systèmes de téléprésence robotique dans des domiciles	18
2.1	Méthodologie expérimentale	18
2.2	Résultats	21
2.3	Observations générales	24
3	INTERFACES-OPÉRATEURS DE TÉLÉOPÉRATION ROBOTIQUE	26
3.1	Concepts importants	26
3.2	Caractéristiques de conception d'interfaces-opérateurs conventionnelles	30
3.3	Considérations à prendre pour la conception de systèmes robotiques téléopérés ...	33
3.4	Modalités de visualisation de l'information	35
3.5	Classification des modalités de visualisation	40
3.6	Études comparatives d'interfaces-opérateurs	42
3.7	Problématique de recherche	46
4	SYSTÈME ROBOTIQUE TÉLÉOPÉRÉ	49
4.1	Plate-forme robotique	49
4.2	Interface-opérateur de téléopération	51
4.2.1	<i>Architecture logicielle</i>	52
4.2.2	<i>Composantes de l'interface-opérateur de téléopération</i>	54
4.2.3	<i>Mécanismes de commandes</i>	54
4.2.4	<i>Modalités de visualisation</i>	58
4.3	Tests de fonctionnalités et de performances du système robotique téléopéré	61
5	MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION	64
5.1	Conditions expérimentales	64
5.1.1	<i>Parcours</i>	65
5.1.2	<i>Variables dépendantes et indépendantes</i>	75
5.2	Tests pour établir les performances de référence	75
5.3	Tests comparatifs avec opérateurs novices	76
5.3.1	<i>Taille d'échantillon</i>	77
5.3.2	<i>Référencement des données</i>	77
6	RÉSULTATS	79
6.1	Tests de performance de téléopération par l'expert	79
6.2	Caractéristiques du groupe d'opérateurs novices	84
6.3	Performances du groupe de novices référencées à celles de l'expert	85
6.3.1	<i>Évaluation de l'apprentissage des novices</i>	89
6.4	Performances auto-référencées	94
6.4.1	<i>Résultats des analyses de variance multi-facteurs</i>	99
6.4.2	<i>Résultats d'utilisabilité</i>	105
7	DISCUSSION ET CONCLUSION	109

8	BIBLIOGRAPHIE.....	116
	ANNEXE A – Questionnaire d’expériences pilotes.....	126
	ANNEXE B - Fonctionnalités de l’interface-opérateur.....	134
	Fenêtres de l’interface-opérateur	135
	Modalités de visualisation	138
	Indicateurs du tableau de bord.....	139
	Connexion avec le serveur du Télérobot	141
	Synchronisation de départ sur le portCS principal	141
	Message de déplacement du robot (RMM)	142
	Message d’états du robot (RGM)	143
	Message d’activation du robot (PLAY, PAUSE, STOP).....	145
	Commande de volant.....	146
	Commande du joystick en mode évitement.....	147
	Commande du joystick en mode poussée.....	148
	Commande par point de chute	150
	Anomalies notées.....	152
	ANNEXE C - Résultats des tests de performance système.....	153
	Communication.....	153
	Transmission des images vidéos.....	153
	Délai de transmission des messages de positionnement du robot	155
	Délai de commande joystick et volant.....	157
	Performances de rafraîchissement des vues de l’interface-opérateur.....	159
	Test de correspondance du modèle et du vidéo	159
	Test d’extrapolation linéaire de position	160
	Performances de positionnement à l’arrêt de commande	164
	Performances de rotation lors de translation	164
	Caractérisation des erreurs de positionnement dans le parcours	164
	ANNEXE D - Séquencement des essais d’opérabilité	169
	ANNEXE E – Questionnaires opérateurs et d’utilisabilité.....	171
	ANNEXE F – A Pilot Study on Teleoperated Mobile Robots in Home Environments.....	181
	ANNEXE G – Formulaire de consentement	187

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 CoWorker-M1	12
Figure 1.2 Interface de téléopération du robot CoWorker-M1	13
Figure 1.3 Robot Magellan	14
Figure 1.4 Interface-opérateur de la plateforme Magellan, carte à gauche et joystick à droite	14
Figure 1.5 Démarche scientifique multidisciplinaire du projet Télérobot.....	16
Figure 2.1 Site A à aires fermées (gauche) et site B à aires ouvertes (droite).....	19
Figure 3.1 Modèle SRK (<i>Skill-Rule-Knowledge</i>) de Rasmussen	27
Figure 3.2 Réalités mixtes	37
Figure 4.1 Télérobot	50
Figure 4.2 Architecture logicielle de l'interface-opérateur de téléopération.....	53
Figure 4.3 Interface-opérateur de téléopération.....	54
Figure 4.4 Mode joystick virtuel JSV en direction avant à vitesse maximum	55
Figure 4.5 Mode volant virtuel VV en direction avant selon position de la barre de vitesse et volant de rotation.	56
Figure 4.6 Navigation par points de chute dans la zone centrale de la modalité RA	58
Figure 4.7 Interface-opérateur de téléopération conventionnelle VC2D.....	59
Figure 4.8 Interfaces-opérateurs améliorées RA3D	60
Figure 5.1 Trajet de la tâche A	68
Figure 5.2 Illustration des étapes de la tâche A : a) début du parcours, b) devant porte de l'armoire et c) photographie de l'affiche 1	68
Figure 5.3 Trajet de la tâche B.....	69
Figure 5.4 Illustration des étapes de la tâche B : a) départ, b) entre la boîte et la table, c) entre la table et la chaise, d) après la table et la chaise, e) près de la boîte 2 et f) photographie de l'affiche 2	69
Figure 5.5 Trajet de la tâche C.....	70
Figure 5.6 Illustration des étapes de la tâche C : a) départ, b) entre la chaise et la table, c) entre la boîte 1 et la table, d) vers l'armoire, e) entre l'armoire et la chaise et f) fin du parcours	70
Figure 5.7 Trajet de la tâche D	71
Figure 5.8 Illustration des étapes de la tâche D : a) début du parcours, b) début slalom, boîte 3, c) dans le slalom, d) fin du slalom, e) vers l'affiche 3 et f) photographie de l'affiche 3	71
Figure 5.9 Trajet de la tâche E.....	72
Figure 5.10 Illustration des étapes de la tâche E : a) départ, b) refait le slalom et c) fin du slalom, boîte 3.....	72
Figure 5.11 Trajet de la tâche F	73
Figure 5.12 Illustration des étapes de la tâche F : a) départ, b) passage de porte et c) fin du parcours.....	73
Figure 6.1 QE pour chaque modalité selon les métriques	87
Figure 6.2 $QE(t)$ en fonction des six tâches.....	87
Figure 6.3 $QE(d)$ en fonction des tâches	88
Figure 6.4 $QE(nc)$ en fonction des tâches.....	89

Figure 6.5 Apprentissage de l'opérateur 1 : a) VC2D, b) RA3D et c) ME3D	91
Figure 6.6 Apprentissage de l'opérateur 6 : a) VC2D, b) RA3D et c) ME3D	91
Figure 6.7 Apprentissage de l'opérateur 36 : a) VC2D, b) RA3D et c) ME3D	91
Figure 6.8 Analyse de contraste pour la tâche A selon $QA(t)$	95
Figure 6.9 Analyse de contraste pour la tâche E selon $QA(t)$	95
Figure 6.10 Analyse de contraste pour la tâche B selon $QA(d)$	96
Figure 6.11 Analyse de contraste pour la tâche C selon $QA(d)$	97
Figure 6.12 Analyse de contraste pour la tâche D selon $QA(d)$	98
Figure 6.13 Analyse de contraste pour la tâche A selon $QA(nc)$	99
Figure 6.14 Analyse de contraste sur $QA(t)$ en fonction du sexe des opérateurs pour la tâche C	101
Figure 6-15 Analyse de contraste sur $QA(d)$ en fonction du sexe des opérateurs pour la tâche C	101
Figure 6.16 Analyse de contraste sur $QA(d)$ en fonction de l'âge des opérateurs pour la tâche E	102
Figure 6.17 Analyse de contraste sur $QA(t)$ en fonction du nombre d'heures de travail sur ordinateur des opérateurs pour la tâche E	104
Figure 6.18 Analyse de contraste sur $QA(nc)$ en fonction du nombre d'heures de travail sur ordinateur des opérateurs pour la tâche E	104
Figure 6.19 Analyse de contraste des perceptions de facilité pour chaque modalité	106
Figure 6.20 Analyse de contraste des perceptions de performance pour chaque modalité	107

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Résultats normalisés pour la mission 1	21
Tableau 2.2 Résultats normalisés pour la mission 2.....	23
Tableau 3.1 Concepts reliés aux niveaux cognitifs	28
Tableau 3.2 Directives de conception de systèmes robotiques téléopérés et de leur interface-opérateur.....	34
Tableau 3.3 Catégories d'interfaces-opérateurs conventionnelles.....	41
Tableau 3.4 Catégories d'interfaces-opérateurs améliorées.....	42
Tableau 3.5 Études comparatives.....	43
Tableau 4.1 Performances du système de téléopération.....	62
Tableau 5.1 Segmentation des tâches sur les parcours.....	74
Tableau 6.1 Variation des performances de l'expert, métrique t	81
Tableau 6.2 Variation des performances de l'expert, métrique d	82
Tableau 6.3 Variation des performances de l'expert, métrique nc	83
Tableau 6.4 Performances moyennes de l'expert pour les trois métriques en fonction des parcours.....	84
Tableau 6.5 Caractéristiques des 37 opérateurs novices.....	84
Tableau 6.6 Profession des opérateurs novices.....	85
Tableau 6.7 Performances référencées QE selon les modalités et les métriques	86
Tableau 6.8 Résultats d'apprentissage de trois opérateurs novices selon la métrique t	92
Tableau 6.9 Résultats d'apprentissage de trois opérateurs novices selon la métrique d	92
Tableau 6.10 Résultats d'apprentissage de trois opérateurs novices selon la métrique nc .	92
Tableau 6.11 Régularité des performances de trois opérateurs novices selon la somme des métriques.....	93
Tableau 6.12 Résultats $QA(t)$ et analyses de variance.....	94
Tableau 6.13 Résultats $QA(d)$ et analyses de variance.....	96
Tableau 6.14 Résultats $QA(nc)$ et analyses de variance.....	98
Tableau 6.15 $QA(t)$ et $QA(d)$ selon le sexe des opérateurs novices pour la tâche C... 100	
Tableau 6.16 $QA(d)$ selon l'âge des opérateurs novices pour la tâche E.....	101
Tableau 6.17 $QA(t)$ et $QA(nc)$ selon les heures de travail sur ordinateur par semaine des opérateurs novices pour la tâches.....	103
Tableau 6.18 Perception de facilité par les opérateurs novices.....	105
Tableau 6.19 Perception de performance par les opérateurs.....	107
Tableau 6.20 Choix de la vitesse du robot permise lors des tests.....	108
Tableau 7.1 Métriques d'évaluation.....	110
Tableau 7.1 Conditions d'expérimentation.....	110

LEXIQUE

CARMEN	Logiciel de localisation et de cartographie développé à Carnegie Mellon
CC	Modalité de visualisation carte centrique
CV	Coefficient de variation
HRI	<i>Human Robot Interaction</i>
JSV	Joystick virtuel, contrôlée par la souris de l'ordinateur
MARIE	<i>Mobile Autonomous Robot Integrated Environment</i>
ME	Modalité de visualisation en réalité et perspective mixte et principalement exocentrique
ME3D	Modalité mixte exocentrique 3D
PortAV	Port de communication audio et vidéo
PortCS	Port de communication de commandes et d'états du robot
PTZ	<i>Pan Tilt Zoom</i>
RA	Réalité augmentée
RA3D	Modalité réalité augmentée 3D
RV	Réalité virtuelle
SA	<i>Situation Awareness</i> , construction mentale de la situation, conscience de la situation
VA	Virtualité augmentée
VC	Modalité de visualisation vidéo centrique
VC2D	Modalité vidéo centrique 2D
VV	Volant virtuel, contrôlé par la souris de l'ordinateur

1 INTRODUCTION

L'augmentation de la proportion de personnes âgées (65 ans et plus) requérant des soins est un problème majeur pour nos sociétés, plus spécifiquement à cause de l'accroissement des coûts des systèmes de santé publique. En 1998, au Canada, les personnes âgées comptaient pour 12,3% de la population totale, ce qui correspond à 3,7 millions de personnes. Selon les tendances identifiées par Santé Canada [Santé-Canada 1999], ce pourcentage passerait à 16% en 2016, 19% en 2020 et au-delà de 23% en 2041. Pour ce qui est du Québec, cette progression serait plus rapide et passerait de 13% à 25 % d'ici 25 ans. Deux facteurs sont responsables de ce phénomène: le premier est la diminution du nombre des naissances, et l'autre est l'augmentation de l'espérance de vie des personnes âgées. Ce second facteur occasionne une augmentation des besoins de soins car une portion importante des années de vie au-delà de 65 ans est caractérisée par la manifestation d'incapacités grandissantes avec l'âge [SAUCIER 1992]. Près de 40% de la population de personnes âgées présente une incapacité, et pour celles demeurant à domicile ce pourcentage est de 35% [SAUCIER 1992]. La croissance de cette population de personnes âgées occasionnera une surcharge sur le réseau de soins de façon générale et en particulier sur le réseau hospitalier. Différentes stratégies sont explorées pour faire face à ce problème, dont une consiste à réduire les séjours en milieu hospitalier. Cette solution a par contre comme conséquence d'augmenter la présence de personnes à risques à domicile.

Les réseaux de santé et des services sociaux s'intéressent de plus en plus à la télésanté [PAPAGEORGES 2001] pour palier au manque de spécialistes en région, pour faciliter le virage ambulatoire et communautaire. La surveillance régulière à distance des personnes et de leur état de santé est très utile pour déterminer les besoins de soins et les interventions de routine ou d'urgence de la part d'intervenants extérieurs, en plus de fournir des données continues et significatives sur l'état d'un patient et de son traitement. Cet aspect particulier de la télésanté touche directement les problèmes associés au fait de laisser les personnes à risques souvent seules durant de longues périodes dans leur domicile, afin d'éviter les conséquences d'accidents et de crises potentielles. L'intérêt des systèmes de télésurveillance pour le maintien à domicile est grandissant et occupera une place importante comme composante technologique [CHUNG 1999, MYNATT 2000]. Cette

approche réduit les conséquences de traumatismes à la personne et de surcharge au réseau d'urgence en étant axée sur la prévention [MILLER 2002]. Outre les raisons économiques ou de surcharge du réseau de soins, le maintien à domicile de ces personnes est aussi une question de qualité de vie [MYNATT 2000].

La problématique de la surveillance de personnes à risques maintenues à domicile soulève plusieurs défis dont certains directement reliés à la technologie et à son application. L'automatisation des systèmes de surveillance demande de solutionner des problèmes technologiques particuliers comme l'identification des risques et des conditions de crises. À ce sujet, Mynatt et al. [MYNATT 2000] préconisent la conception d'environnements « ingénieux » (*smart environment*), aussi qualifiés de « futés » ou d'« intelligents », orientés vers l'atteinte de trois objectifs : 1) reconnaître et éviter les conditions de crises ; 2) assister les personnes âgées dans leurs routines journalières ; et 3) sécuriser les enfants adultes sur la condition de leurs parents. Ils préconisent la considération prioritaire de six aspects clés pour réaliser des systèmes commercialement intéressants : sécurité, efficacité, utilisabilité, coût, performance et fiabilité.

La surveillance dans les domiciles est traditionnellement couverte par les systèmes commerciaux de sécurité et d'alarme contre l'intrusion et les incendies, mais le domaine émergent de la domotique¹ intègre aussi la surveillance en plus de possibilités d'intervention sur les systèmes et appareillages de l'habitat. Le concept de domotique, qui émergea dans les années 1970, concerne la mise en réseau des différents sous-systèmes de la résidence entre eux et avec le monde extérieur (passerelle de communication avec les pourvoyeurs de services : câble, téléphone, électricité, satellite, gaz, Internet, etc.) [TOPALIS 2000], pour leur permettre d'exécuter leurs tâches plus intelligemment et aussi d'en fournir d'autres plus systémiques. Ce concept d'environnement intelligent [COEN 1998] se répand en fait de plus en plus et atteint tout espace de vie [MORAN 1999], de travail ou de déplacement, maison, bureau, voiture et même sur soi, grâce aux techniques sans fil, portable, cellulaire, assistant, ordinateur de poche, etc.

¹ Du latin *domus*, signifiant domicile et de *tique* du mot informatique pour décrire un nouveau domaine d'application de la technologie de mise en réseau des appareils de la résidence grâce à l'électronique et à l'informatique.

Beaucoup d'efforts sont déployés pour améliorer l'environnement des personnes maintenues à domicile par le truchement de différentes technologies installées dans la résidence (système d'alarmes et de sécurité, système de surveillance médicale comportant des senseurs sur la personne, etc.) [DILGER 1998, ANDERSON 2000, HAIGH 2002a, GIROUX 2006]. De tels systèmes peuvent contribuer à l'amélioration des communications de la personne maintenue à domicile avec l'extérieur, et par conséquent de sa sécurité et sa qualité de vie. Les systèmes de télésurveillance peuvent contribuer à garder contacts avec les personnes maintenues à domicile sans occasionner des déplacements coûteux en temps et énergie de la part du personnel en charge et des parents ou amis. Si l'on favorise le contact fréquent des personnes soignantes formelles ou informelles ainsi que des parents et amis avec la personne sous surveillance, il est plus facile de détecter l'apparition de comportements ou de symptômes anormaux.

Ces technologies, bien que de plus en plus performantes, sont orientées vers la surveillance grâce à des capteurs fixes (mouvement, présence, contact d'accès, chute, panique, audio et vidéo, etc.) répartis dans la résidence, ou portables (biophysiological, chute, mouvement, panique, audio, etc.) sur la personne même. Ces systèmes peuvent aussi comporter des actionneurs capables d'intervenir sur l'environnement de la résidence mais non pas physiquement sur la personne. Cette approche oblige évidemment d'avoir un grand nombre de senseurs en fonction du nombre de pièces. La complexité à équiper les environnements réels croît rapidement et il est pratiquement impossible de prévoir toutes les situations d'urgence où les senseurs permettraient d'obtenir les informations utiles. La situation de capteurs fixes oblige à avoir plusieurs senseurs de même type (caméra, audio bidirectionnel, etc.) dans la même pièce et avec des points de vue différents pour éviter les situations où certains d'entre eux seraient obstrués ou mal positionnés, altérant ainsi la capacité de détection et d'intervention des surveillants pour un cas précis d'urgence. Cette situation entraîne des coûts et une complexité croissante, en plus de compromettre le respect de la vie privée des gens.

1.1 Assistance robotique pour les soins à domicile

Une nouvelle approche pour contribuer au maintien des personnes à domicile consiste à utiliser des robots mobiles autonomes ou téléopérables capables de se déplacer

dans l'environnement, d'être en mesure de faire de la surveillance et de les assister physiquement [MANKOFF 1998, LACEY 1998]. Ces systèmes utilisant des robots équipés de capteurs, d'actionneurs et de liens de communication peuvent fournir des informations sur le patient, le contexte et son environnement ainsi qu'agir comme aide technique, ceci à cause de leur capacité à être positionné là où se trouve la personne. Ainsi, une plate-forme robotique téléopérée permettrait à différents intervenants (professionnels de la santé, soignants, parents) d'être virtuellement présents (téléprésence de l'opérateur) au domicile du patient si le besoin est, réduisant ainsi le nombre de visites ou le délai d'intervention auprès du patient, en plus de pouvoir fournir des informations cruciales en situations d'urgence et ceci possiblement avant l'arrivée d'intervenants de l'extérieur. Leur mobilité permettrait de déplacer les senseurs installés sur la plate-forme robotique à différents endroits dans le domicile, afin d'obtenir des informations à partir de perspectives autres que celles fournies par des capteurs fixes. Par exemple, lorsqu'un patient fait une chute, demeure incapable de se déplacer ou est inconscient, le robot mobile pourrait être conduit vers le patient afin d'établir un contact visuel et arriver à communiquer plus directement avec l'individu. Ceci permettrait d'obtenir des informations utiles même dans des conditions de crise ou d'urgence qui peuvent s'avérer périlleuses pour les intervenants (incendies, tempêtes, etc.).

Afin d'identifier comment un système robotique peut être exploité efficacement dans ce qu'il qualifie d'écosystème du vieillissement, Forlizzi et al. [FORLIZZI 2004] suggèrent que les robots d'assistance doivent s'intégrer parfaitement dans le milieu de vie des occupants, supporter adéquatement leurs valeurs, être adaptatifs et être utilisables par tous les membres de cette écologie. Ce concept d'écosystème du vieillissement englobe quatre aspects :

- **Les personnes.** En premier lieu, il faut considérer leurs problèmes spécifiques de santé (maladie, handicap, déficience, etc.), familiaux et sociaux. Il faut ensuite considérer leur sécurité en examinant les aspects suivants [SCHRAFT 1999, DUBOWSKY 2000] :
 - Surveillance des paramètres vitaux (pression, respiration, rythme cardiaque, température, glucose, etc.).

- Surveillance des paramètres mentaux (comportement, réactivité, oubli, etc.).
- Reconnaissance de manque de signes vitaux, de routine journalière ou de comportements anormaux (chute, immobilisation, tâche non exécutée, etc.).
- Sécurité de l'environnement et de la personne (fumée, feu, gaz, eau, intrusion, accès, électroménagers, etc.).
- Gestion de la santé (prise de médicaments, rendez-vous, soins, informations, motivation, etc.).

La gestion des activités de soins est en soi une problématique qui va généralement de façon croissante avec l'évolution de l'état des patients ou du moins avec l'âge de ces personnes. On sait que certaines maladies évolutives diminuent les capacités intellectuelles, dont la mémoire. Cette situation crée une pression grandissante sur les soignants et le système qui doivent compenser les pertes d'autonomie des patients. Il faut donc que la technologie facilite le travail des intervenants sans pour autant diminuer la sécurité ni le bien-être des personnes sous surveillance. Ensuite, il faut aussi considérer le respect de la vie privée. Cette considération est majeure pour une application de télésanté incorporant de la surveillance à domicile. L'humain est encore un élément essentiel dans la boucle des systèmes de surveillance de personnes à cause, entre autres, de ses capacités à reconnaître des conditions à risques ou de malaise de la personne, et à intervenir adéquatement. Cette surveillance humaine est nécessaire mais reste perçue comme une embuche importante à cause de l'intrusion dans la vie quotidienne de la personne sous surveillance. Les technologies de télésurveillance rencontrent donc un défi particulier où elles doivent procurer un minimum d'automatisation tout en permettant d'améliorer le rôle de supervision des personnes soignantes, et ceci sans essayer de les remplacer [HAIGH 2002b].

- **Les produits.** Forlizzi et al. ont trouvé lors de leur étude sur l'ethnographique que les personnes âgées utilisent et retiennent dans leur environnement les

produits qui supportent leurs besoins, et les plus importants sont ceux qui supportent leurs valeurs d'identité personnelle, de dignité et d'indépendance [FORLIZZI 2004].

- **Les environnements.** Les environnements résidentiels sont très diversifiés et couvrent à peu près tout ce que l'on peut trouver comme type d'habitats (maison, appartement, immeuble, foyer de personnes âgées, etc.). Certains de ces lieux datent de plusieurs années, d'autres sont plus récents ou encore nouvellement construits. Une grande diversité d'équipements de contrôle et d'appareillage se retrouve dans ces environnements. L'intégration idéale de ces appareillages est en fait pratiquement inexistante sauf dans des installations très poussées et coûteuses. Cette diversité d'environnements produit des situations complexes et imprévisibles, d'autant plus que les locaux sont configurés différemment, avec des surfaces diverses (bois, céramique, tapis, etc.), des lieux complexes (escalier, salle de bain, cuisine, etc.) et qu'ils contiennent des meubles et objets spécifiques (meubles lourds et légers, chaises, table, coussins, etc.) d'une grande diversité évoluant dynamiquement de jour en jour. Ainsi, les environnements résidentiels ne sont pas sans dangers pour les personnes à risque, et d'ailleurs plusieurs facteurs ont été identifiés et reliés aux problèmes potentiels [GITLIN 2001].
- **La communauté.** Il ne faut pas négliger la présence d'autres personnes qui vivent possiblement dans l'environnement de la personne à risques, de même que tout visiteur ami, voisin, aide aux soins, personnel d'entretien et de réparation, etc. Ces personnes doivent pouvoir évoluer sans déranger le bon fonctionnement du système [STIEFELHAGEN 1998] et sans qu'il ne soit nécessaire de le désactiver en leur présence. Enfin, il y a les animaux de compagnie, chien, chat, etc. qui doivent être pris en considération et même superviser leurs comportements et leurs besoins. Tous ces aspects imposent aux produits d'avoir une grande fiabilité ainsi qu'une facilité d'utilisation et d'entretien.

Les robots mobiles de télésoins doivent donc être conçus pour offrir des services permettant d'augmenter la sécurité des personnes à risques, tout en restant sécuritaires pour les robots. En robotique, assurer la sécurité des individus dans le lieu où se trouve le robot, de même que l'environnement et le robot lui-même, est primordial [NOKATA 2004]. En effet, les robots opérant dans des domiciles doivent faire face à des espaces restreints et comportant de nombreux obstacles (escaliers, seuil de portes, tapis, meubles, rideaux, vêtements, etc.) et cela en présence des occupants. Tout ceci procure des situations s'échelonnant de simples à très complexes avec lesquelles le système et l'opérateur doivent composer.

Les robots de télésoins peuvent être conçus pour être autonomes ou téléopérés. Malheureusement, la technologie actuelle n'est pas suffisamment fiable et robuste afin d'être exploitée pour concevoir des systèmes complètement autonomes opérant dans nos milieux de vie. Par contre, la présence continue d'un opérateur humain dans la boucle d'opération d'un robot téléopéré peut permettre d'atteindre un objectif réaliste à brève échéance pour des applications de télésoins (e.g., la télésurveillance, le télégardiennage, la téléadaptation) sécuritaire et pratique. L'opérateur peut ainsi, par téléprésence, percevoir la situation dans l'environnement distant et interagir par l'intermédiaire du système robotique. Le concept de téléprésence originellement cité par Minsky [MINSKY 1980] est relié à l'expérience de l'opérateur qui se sent présent dans un environnement distant réel ou virtuel. La téléprésence survient lorsque suffisamment d'informations qui sont projetés sur l'environnement distant et le robot sont présentées de façon naturelle et l'amène par conséquent à se sentir physiquement présent dans cet environnement [SHERIDAN 1992]. La qualité de la téléprésence serait en fait un critère de conception et d'évaluation important pour les interfaces-opérateurs de tels systèmes [RILEY 2004]. Une des premières applications de téléprésence robotique est celle de Paulos [PAULOS 1998] où un bras articulé de robot, munie d'une caméra, permettait aux utilisateurs distants d'explorer par Internet un espace composé d'une collection de pièces de musée. Les opérateurs pouvaient ainsi explorer les alentours, chercher et examiner des objets, converser, lire et faire des gestes simples. Plus récemment, Draper [DRAPER 1999] définit la téléprésence comme étant une expérience où l'opérateur s'auto-perçoit dans un environnement médiatisé par

ordinateur. La mobilité d'un robot de téléprésence procure donc au surveillant un degré d'action que les autres systèmes fixes ne peuvent atteindre.

Deux types d'interaction humain-robot (*Human-Robot Interaction*, ou HRI) peuvent s'observer avec un robot de téléprésence: 1) Interaction entre l'opérateur et l'environnement distant; 2) Interaction entre le robot et un ou des individus de l'environnement distant. Reprenant les aspects spatio-temporels utilisés dans la taxonomie présentée par Yanco [YANCO 2004a], avec le type 1 les interactions sont synchrones et non co-localisées, tandis que pour le type 2 elles sont synchrones et co-localisées. Un cas particulier de ce type 2 survient lorsque l'opérateur téléopère le robot tout en étant dans le même environnement.

L'interface-opérateur joue un rôle prépondérant pour les interactions de type 1, principalement dans sa capacité de permettre à l'opérateur de bien cerner et d'appréhender les situations distantes dans lesquelles se trouve le système de téléprésence. Ceci est qualifié de conscience de la situation (*Situation Awareness*) [ENDSLEY 1988] et est affecté par la perception de la position du robot dans l'environnement, de son entourage et de son état, la compréhension de la signification de ces informations, et la projection du comportement futur du robot [YANCO 2004b]. Cette définition présente donc trois niveaux d'activités cognitives de l'opérateur, à savoir la perception, la compréhension et la capacité de projection ou d'anticipation. Il est possible de l'évaluer en examinant chacun de ces aspects [SCHOLTZ 2005]. Lors de compétitions de mission en recherche et sauvetage urbain, il a été démontré que le niveau de conscience de la situation doit être suffisant et continu pour assurer des opérations sécuritaires et efficaces, et qu'un faible niveau de conscience de la situation est source de confusion [YANCO 2004b - DRURY 2003]. En plus de la qualité de l'interface-opérateur, l'expérience de l'opérateur joue aussi un rôle direct sur la sécurité et la performance de missions de téléopération [BRUCH 2000, CASPER 2003]. Par exemple, dans des opérations de recherche et de sauvetage, les téléopérateurs experts peuvent mieux composer avec le stress et la surcharge d'informations, comparativement à des opérateurs novices ou peu expérimentés [CASPER 2003].

1.2 Plates-formes robotiques pour l'assistance et la téléprésence

La catégorisation des robots pour des applications d'assistance et de téléprésence n'est pas aisée et diffère selon le contexte et les auteurs : robots de réadaptation [TEJIMA 2000], robots personnels [ROY 2000], robots serveurs [BISCHOFF 1998], robots assistants [HAEGELE 2001] et robots de sécurité [CICCIMARO 1998]. La définition élargie des robots de réadaptation [TEJIMA 2000] rassemble non seulement les robots d'aide à la manipulation et au déplacement de personnes déficientes, mais aussi d'aide de façon générale aux personnes âgées. Toutefois, ces robots restent des prototypes utilisés dans des conditions contrôlées qui doivent encore être validés en conditions d'opération réelles avant de pouvoir être utilisables dans des applications en milieux résidentiels.

1.2.1 Robotique d'assistance

Cette catégorie [HAEGELE 200, FONG 2003] regroupe des robots autonomes et interagissant avec les humains. Leur téléopération n'est pas privilégiée mais parfois prévue.

- **MOVAID** [BISCHOFF 1998]. Développé dans le cadre d'un projet de la Commission d'énergie atomique Française CEA, ce robot a comme objectif de fournir assistance aux personnes handicapées en effectuant pour elles des tâches ménagères. Il possède un bras manipulateur muni de senseurs de proximité et d'une caméra montée sur une plate-forme mobile [DARIO 1999, GELIN 1997]. Il possède un système de navigation et de localisation lui permettant entre autres de suivre une trajectoire. Les premiers tests ont été faits en 1996 en Italie au laboratoire *Santa Anna High School* de Pise. Cette plate-forme robotique vise des applications où l'autonomie du robot est sollicitée plutôt que sa téléopération. L'information disponible ne mentionne pas si un lien de téléopération a été développé et expérimenté.
- **Care-O-Bot** [SCHAEFFER 1999 - SCHRAFT 1999]. Ce robot a été développé en Allemagne pour les personnes âgées ou handicapées maintenues à domicile, afin de leur permettre de demeurer indépendantes et de les supporter lors de leur déplacement et dans l'exécution de tâches quotidiennes. L'emphasis mise pour ce robot porte sur les aspects de communication et de sociabilité, ceci grâce à un vidéophone. Il intègre aussi un système d'appel d'urgence automatique. La version

- Il de ce robot comporte un bras manipulateur [SCHRAFT 2000]. Care-O-Bot possède une capacité de déplacement de dix heures, intègre un gyroscope et un laser pour son positionnement ainsi qu'une caméra. Il est muni d'un écran tactile pour interagir avec les usagers. Un lien de communication sans fil Ethernet permet sa téléopération mais l'objectif poursuivi pour ce robot est de le rendre autonome.
- **ARPH** [OTMANE 2001]. Le projet ARPH (*Assistance Robot for People with Handicap*) développé par le groupe du CEMIF (Groupe des Systèmes Complexes de l'Université d'Évry) en France appartient à la catégorie de robot mobile équipé de bras articulé [OTMANE 2001, HOPPENOT 2001]. Ce système d'assistance est composé d'une station de commande et d'un robot mobile muni d'un bras manipulateur, le tout téléopérable par la personne handicapée. Le but premier de ce système est de restaurer partiellement ou complètement des capacités de manipulation de l'utilisateur. Ce système se compose d'une station de commandes et d'un bras manipulateur monté sur une plate-forme mobile. Les missions sont de deux types : se déplacer vers des objets précis et manipuler ces objets. Pour ce projet, la téléopération est faite avec une interface pour la personne handicapée dans les lieux mêmes d'utilisation.
 - **Pearl** [ROY 2000]. Du projet Nursebot regroupant les universités de Canergie Mellon, Michigan et Pittsburg, Pearl met l'accent sur l'interaction humain-robot. Le but visé est de fournir une aide cognitive aux personnes dans leurs activités quotidiennes, ainsi qu'une aide au déplacement combinée à la détection de conditions d'urgence pour les soins en résidence ou en milieu hospitalier pour personnes âgées [POLLACK 2002, ROY 2000]. Pearl est construit à partir d'une base mobile de type Nomad Scout équipée avec 16 sondes de distance à ultrason et d'un balayeur laser SICK PLS. Pearl comporte un écran tactile couleur et possède une tête dont le visage peut présenter différentes expressions. Les yeux sont faits à partir de deux caméras couleur et il possède un microphone et un haut-parleur pour la communication vocale. Pearl a une hauteur d'environ un mètre et possède deux roues motrices et des roues pivotantes de stabilisation. Il possède une interface pour la reconnaissance des commandes vocales d'un utilisateur. Pearl possède un

système de navigation sophistiqué et est capable d'acquérir une carte des lieux où il évolue. Il intègre des facilités de téléprésence complète par un lien sans fil audio et vidéo, mais les expérimentations répertoriées sont axées encore une fois sur le fonctionnement autonome du robot.

- **Asimo.** Fabriqué par Honda, ce robot humanoïde mesure quatre pieds de haut, il est semi-autonome et pèse 45 kg. Un opérateur se sert d'un ordinateur portable pour faire la sélection de commandes appropriées. Ce robot marche, danse et monte des escaliers. Il possède deux caméras et un total de 26 degrés de liberté. Son autonomie énergétique est autour de trente minutes entre chaque charge. S'il fait une chute, il ne peut toutefois se relever par lui-même. La commercialisation de ce robot n'est pas encore envisagée par la compagnie à cause, entre autres, des limitations dans son autonomie fonctionnelle et énergétique.
- **Wakamaru.** Ce robot est développé par la compagnie *Mitsubishi Heavy Industries* et a été dévoilé au *Robodex 2003*. Il vise une application d'assistance pour les personnes âgées. Ce robot d'un mètre de haut est équipé de fonctions dans le but d'aider les personnes âgées ou malades, et plus particulièrement l'envoi d'alarmes à une centrale ou un hôpital en cas d'urgence. Le robot est équipé d'une caméra, d'un microphone et d'un lien de télécommunication permettant à un opérateur distant de faire de la téléprésence. Ce robot possède aussi une interface vocale de 10,000 mots japonais.
- **ApriAlpha.** Introduit par Toshiba lors de l'exposition *Robodex 2003*, ce robot de service vise entre autres une application d'assistance aux personnes âgées ou malades. Ce robot peut reconnaître une centaine de visages et possède un système de reconnaissance et de synthèse vocale. Il communique via un réseau sans fil IEEE 802.11b, par lien infrarouge et aussi selon le protocole Bluetooth. Il se déplace par lui-même et évite les obstacles. La caméra peut permettre de prendre des photos et les transmettre par téléphones mobiles.

1.2.2 Robot de téléprésence

Cette catégorie regroupe les systèmes suivants :

- **AmigoBot et PatrolBot.** Ces robots sont actuellement vendus par la compagnie *Mobile Robots Inc.*, cette même entreprise qui commercialise le robot Pioneer (à la base du robot PatrolBot). L'AmigoBot dispose de huit sonars, six à l'avant et deux à l'arrière. Il peut aussi comporter une caméra et un microphone pour un lien audio/vidéo. Le PatrolBot possède plus de sonars (seize) et peut porter des capteurs plus sophistiqués comme un capteur laser de proximité (SICK LMS) et une caméra pan-tilt-zoom. Une interface de téléopération est disponible et comporte une vue de la caméra et une de la carte des lieux où évolue le robot.

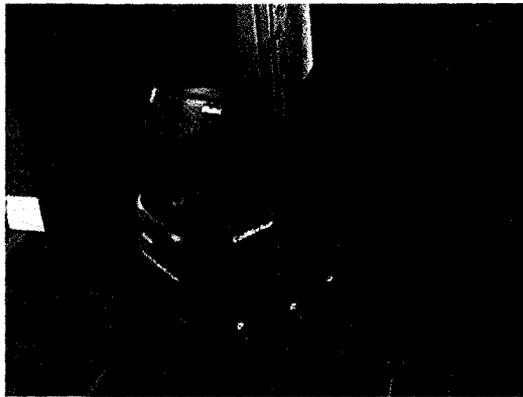


Figure 1.1 CoWorker-M1

- **CoWorker.** Le CoWorker, montré à la figure 1.1 et fabriqué par la compagnie américaine *iRobot Corporation*, est un robot de téléprésence doté d'une caméra montée sur un cou, d'un lien de communication Ethernet 802.11b sans fil, d'un sonar rotatif et de capteurs de proximité infrarouges. Le CoWorker comporte un lien téléphonique pour la communication vocale bidirectionnelle mis en œuvre par un combiné portable communiquant avec une station téléphonique de base branchée au réseau de téléphone. Le poste de base peut établir une communication en mode « intercom » avec le combiné du robot sans utilisation de ligne extérieure. Le sonar rotatif permet de visualiser les obstacles sur 180° à l'avant du robot avec une résolution de 8.2° et jusqu'à une distance de 3,6 m. Seize senseurs infrarouges à moyenne distance (portée 60 cm, 10 Hz) servent aussi pour la navigation. Dix senseurs infrarouges à courte distance (15 cm de portée pour ceux vers l'avant et vers l'arrière, et 5 cm pour ceux vers les côtés, 20 Hz) servent comme pare-choc autour du robot. Lorsque le robot se déplace, les senseurs infrarouges peuvent

percevoir les parois et objets dans une zone verticale de 7 cm à 50 cm seulement. Une télécommande à infrarouge permet de commander directement la plate-forme pour des déplacements locaux. L'interface de téléopération, montrée à la figure 1.2, fonctionne par l'intermédiaire d'un navigateur WEB. Elle comporte une vue de la caméra du robot (au centre), une vue de dessus des lectures provenant des senseurs infrarouges et du sonar rotatif (en haut à gauche), et d'un tableau de commandes pour l'opération et l'affichage des états du robot (au bas). Pour déplacer le robot, il suffit de cliquer dans la vue vidéo (le robot se déplace alors au point désiré tout en évitant les obstacles) ou encore d'utiliser les modalités de contrôle du tableau de commandes.

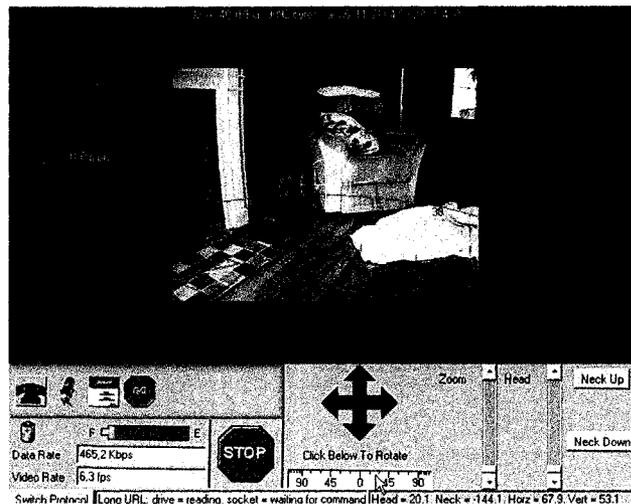


Figure 1.2 Interface de téléopération du robot CoWorker-M1

- **Magellan Teleop.** Cette plateforme a été mise au point à partir d'un robot Magellan, montré à la figure 1.3. Ce robot est équipé de seize senseurs de proximité infrarouge, de seize sonars et de seize pare-chocs distribués autour du robot, d'un capteur laser de proximité (SICK) et d'une caméra pan-tilt-zoom. L'interface-opérateur a été conçue avec l'environnement de programmation MARIE (*Mobile Autonomous Robotic Integrated Environment*) [CÔTÉ 2004] permettant d'intégrer diverses applications logicielles non spécifiquement conçues pour travailler ensemble. Telle que montrée à la figure 1.4, l'interface-opérateur présente la vue d'une carte des lieux (à gauche) préalablement construite par le balayage du senseur laser du robot dans la résidence et du traitement par le logiciel CARMEN (Carnegie

Mellon Navigation Toolkit [MONTEMERLO 2003]). Le positionnement du robot et la présentation de la carte durant la téléopération sont aussi réalisé par le logiciel CARMEN. L'opérateur donne des commandes de déplacement au robot en plaçant des points de position sur la carte et en activant le bouton de départ GO (en bas au centre). Le robot se déplace alors de façon autonome vers le point de position spécifié à l'aide du chemin trouvé par CARMEN pour s'y rendre, tout en évitant les obstacles. Un bâton de commandes ou joystick virtuel (JSV), représenté par un point noir dans le cercle rouge, permet de déplacer le robot de façon manuelle en tout temps.



Figure 1.3 Robot Magellan

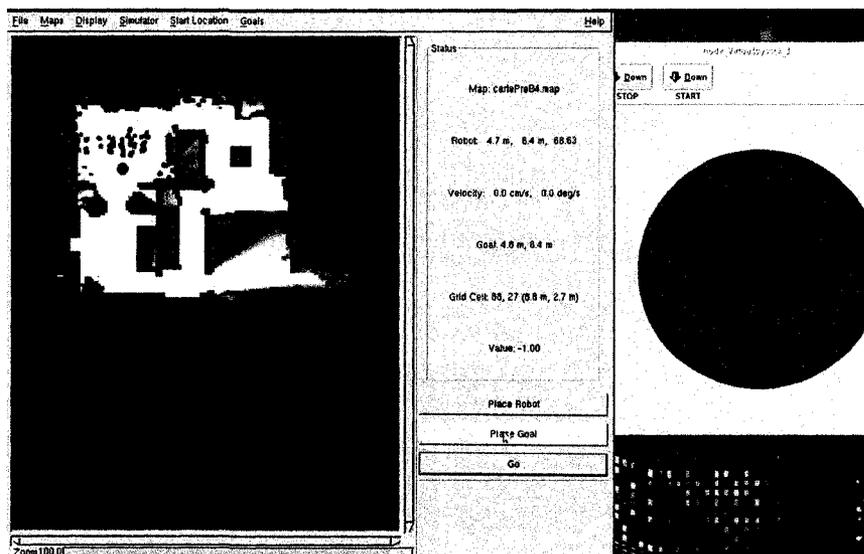


Figure 1.4 Interface-opérateur de la plateforme Magellan, carte à gauche et joystick à droite

1.3 Projet de recherche

À ce jour il n'existe pas d'études démontrant la capacité des robots répertoriés à la section 1.2 à évoluer de façon sécuritaire et efficace dans des environnements résidentiels. Pour certains robots, il peut même s'avérer difficile d'imaginer y arriver en des conditions idéales, voir même dangereux pour les patients ou autres personnes à proximité du robot. Bien que plusieurs domaines d'application de la télérobotique ont apparemment des besoins similaires (recherche et secours d'urgence en milieu urbain, sécurité et surveillance, assistance aux personnes, téléprésence, etc.), il n'est pas encore évident de pouvoir concevoir précisément des systèmes sécuritaires, efficaces et utilisables pour chacun de ces domaines d'application [NOKOTA 2004]. Les éléments en jeu pour de tels systèmes sont : le robot (e.g., dimensions, poids, senseurs, actionneurs, mécanismes de locomotion, système d'opération et de traitement), le système de télécommunication (e.g., largeur de bande, qualité de service, débit), l'interface-opérateur (e.g., modalités de présentation de l'information, mécanismes de contrôle) et les opérateurs (e.g., expérimentés, novices).

Notre démarche s'inscrit dans un effort concerté visant à concevoir un nouveau système robotique mobile de téléprésence pour les télésoins ou la télésurveillance à domicile. L'approche adoptée est itérative et veut identifier de façon incrémentale les influences potentielles et les considérations critiques pour un tel système. La figure 1.5 présente les différentes activités et contributions des personnes qui sont impliquées sur le projet Télérobot. Par exemple, la tenue de groupes de discussions focalisées nous a permis d'identifier des applications potentielles pour le système de téléprésence robotique, avant même sa réalisation [BOISSY 2006]. Une fois un prototype complet de système de téléprésence conçu et évalué, d'autres études seront ensuite menées pour mieux cibler ces applications. Couvrir l'ensemble des dimensions propres à la conception d'un robot mobile de téléprésence pour les télésoins ou la télésurveillance à domiciles telles que décrites précédemment déborde largement du cadre d'un seul doctorat. Nous nous sommes plutôt intéressés à un élément central à toutes ces dimensions, soit l'interface-opérateur.

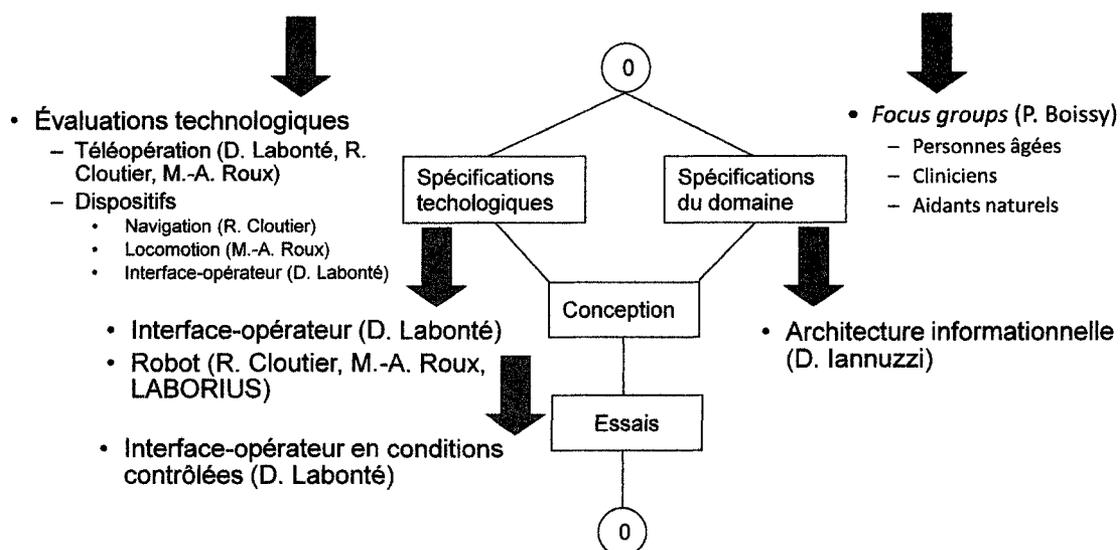


Figure 1.5 Démarche scientifique multidisciplinaire du projet Télérobot

Le système de téléopération robotique se base sur la réalisation d'une téléprésence de l'opérateur dans le but de lui permettre d'exercer à distance ses capacités à évaluer et interagir avec une personne, reconnaître des situations ou des environnements inappropriés et à risque. C'est par le mécanisme de téléprésence que l'opérateur peut réaliser ces actions. La qualité de la téléprésence en termes de sécurité et d'efficacité découle de l'intensité et du maintien de la conscience de la situation par l'opérateur. La charge cognitive des opérateurs est identifiée comme étant trop sollicitée avec des conceptions d'interfaces-opérateurs conventionnelles centrées sur des images vidéo et de multiples fenêtres pour présenter de façon visuelle les informations des divers senseurs.

L'objectif principal de cette programmation de recherche est d'identifier des facteurs clés de conception et d'utilisation d'interface-opérateur de téléopération de robot mobile afin d'améliorer les performances d'opérateurs novices ou inexpérimentés à réaliser des opérations sécuritaires et efficaces de robots dans des domiciles. Ce travail s'effectue selon une approche holistique, c'est-à-dire qu'elle se réalise en intégrant les interfaces-opérateurs nouvellement conçues et évaluées sur une nouvelle plate-forme robotique mieux adaptée pour les domiciles, et en considérant les contraintes d'expérimentation avec des humains.

1.4 Organisation de la thèse

Étant donné la diversité des considérations à prendre pour la conception d'interfaces-opérateurs de téléprésence robotique dans des domiciles ainsi que le peu de données recensées à ce sujet, nous avons décidé de débiter nos travaux en réalisant une étude pilote avec des robots de téléprésence dans des domiciles. Cette étude a permis de mettre en évidence, d'une part, des informations sur les contraintes d'utilisation pour des opérateurs novices de système de téléopération robotique existants lors de déplacement de robots dans des domiciles, et d'autre part, d'acquérir des informations sur les caractéristiques requises par un système de téléprésence robotique dans ce genre d'application et d'environnement [LABONTÉ 2006a]. L'étude a aussi contribué à se familiariser avec les défis à relever concernant la méthodologie expérimentale impliquant l'observation des interactions entre un opérateur et un système de téléprésence robotique. Les résultats de cette étude sont présentés au chapitre 2.

Le chapitre 3 présente une revue de la littérature sur les interfaces-opérateurs pour la téléprésence robotique, ainsi qu'une analyse mettant en lumière des lignes de conduite pour une meilleure conception des interfaces-opérateurs. Combinant ces lignes de conduite avec les observations notées lors de l'étude pilote, le chapitre 4 décrit la nouvelle interface-opérateur incorporant trois modalités de visualisation (dont deux nouvelles) et différents mécanismes de contrôle. Cette interface-opérateur a été intégrée au robot mobile de téléprésence spécialement conçu dans ce projet, nommé Télérobot.

C'est en utilisant chacune de ces modalités de visualisation, prise individuellement dans des mêmes conditions expérimentales, qu'il nous est possible d'étudier leurs avantages et leurs limitations pour la téléopération robotique. Le chapitre 5 décrit de façon exhaustive notre méthodologie d'expérimentation et de caractérisation des modalités de visualisation. Le chapitre 6 présente les résultats par groupes d'opérateurs et met en évidence les performances des opérateurs novices en rapport à celles d'un opérateur expert en fonction des différentes métriques quantitatives et qualitatives. Le chapitre 7 conclut sur la portée de nos résultats par rapport à l'état de la recherche sur les interfaces-opérateurs, identifiant en quoi notre interface-opérateur améliore les performances des novices.

2 ÉTUDE PILOTE DE SYSTÈMES DE TÉLÉPRÉSENCE ROBOTIQUE DANS DES DOMICILES

Bien que plusieurs plates-formes robotiques (d'assistance ou de téléprésence) s'identifient comme utilisables en milieux résidentiels (voir section 1.2), aucune donnée précise sur leurs performances dans de telles conditions n'est rapportée. Pour avoir une idée claire du genre de difficultés à surmonter pour de tels usages, il était nécessaire de mener une étude pilote avec des systèmes de téléprésence robotique [LABONTE 2006a]. La question abordée dans cette étude pilote est :

Quelles sont les contraintes d'utilisation des opérateurs novices de systèmes de téléopération robotiques actuels pour le déplacement et le positionnement de robots mobiles dans des domiciles ?

Le but de cette étude pilote, réalisée à l'automne 2004, n'était pas de faire une étude exhaustive des performances des systèmes actuels, mais plutôt de déterminer les éléments critiques à prendre en considération lors de la conception d'un nouveau système de téléopération pour la présente application. L'approche qui a été utilisée était de nature transversale et favorisait l'exploration des conditions d'opérations selon divers facteurs (systèmes robotique, interfaces-opérateurs, stratégies de navigation, missions, opérateurs, domiciles), plutôt qu'une approche spécialisée ou en profondeur avec peu de facteurs et un grand nombre d'opérateurs et d'essais. Les résultats de cette étude ont été diffusés sous forme d'article de conférence [LABONTE 2006a] et présentés à l'annexe F.

2.1 Méthodologie expérimentale

Nous avons choisi d'expérimenter avec deux plates-formes robotiques, le CoWorker (voir figure 1.1) et le Magellan Teleop (voir figure 1.3), car elles permettent d'étudier deux types d'interfaces-opérateurs largement utilisés dans les systèmes de téléprésence. Tel que décrit à la section 1.2, le CoWorker utilise une interface-opérateur conventionnelle basée sur la vue vidéo de la scène à partir d'une caméra montée sur le robot, en spécifiant des points de chute pour le diriger. Le Magellan Teleop présente une carte de l'environnement sur laquelle

des points de position sont identifiés par l'opérateur pour déplacer le robot. Une interface-opérateur utilisant une vue centrée sur un flux vidéo est dite Vidéo Centrique (VC) alors qu'une basée sur une carte est Carte Centrique (CC). Les vitesses de déplacement des robots étaient similaires. Le lien de communication entre les robots et le poste de téléopération consistait en un réseau sans fil (802.11b) et utilisait le protocole de communication Internet (TCP/IP).

Afin d'être confrontés à des conditions d'opération diversifiées, l'étude fut conduite dans deux résidences ayant des configurations de pièces différentes, l'une à aires fermées comportant quatre pièces reliées par des ouvertures et corridors, et l'autre à aires ouvertes. La figure 2-1 présente les plans de ces domiciles qui ont une superficie équivalente de 60 mètres carrés.

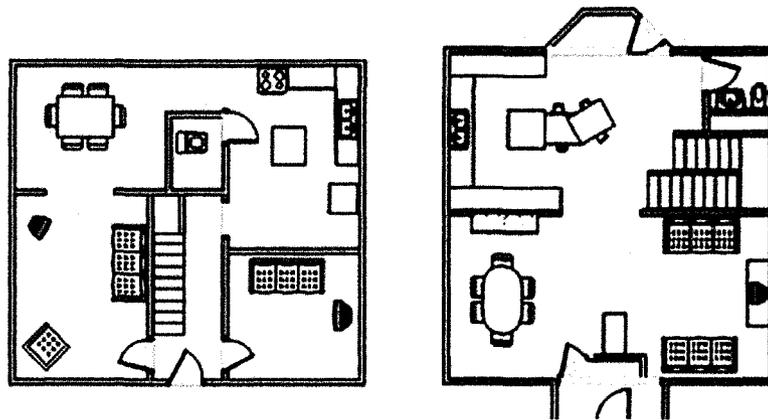


Figure 2.1 Site A à aires fermées (gauche) et site B à aires ouvertes (droite)

Trois types d'opérateurs ont été impliqués dans l'étude : un expérimenté, deux entraînés et deux novices. L'opérateur expérimenté cumulait au-delà de cent heures d'opération en laboratoire avec ces systèmes, et une vingtaine d'heures dans les domiciles. Ses performances sont considérées quasi-optimales car elles correspondent à au moins 90% de celles pouvant être obtenues par le système si le robot se déplace à vitesse maximum selon le trajet demandé. Ses performances servent de référence en rapport à celles des autres opérateurs. Les opérateurs entraînés (roboticiens de formation) ont reçu une formation en laboratoire sur une période minimale de trois heures. Ils démontraient alors des performances à 20% de celles de l'opérateur expérimenté. Les opérateurs novices (des chercheurs en gériatrie), quant à eux, ont eu uniquement 10 minutes de familiarisation et d'essais avec

chaque système avant leur utilisation. Chaque opérateur a examiné par lui-même les parcours d'essais avant d'effectuer les missions dans chaque domicile.

Les opérateurs ont eu à réaliser deux missions : 1) faire le tour du domicile et revenir au point de départ; 2) faire le tour du domicile tout en évitant trois obstacles (un ballon, une simulation d'une porte d'armoire ouverte fabriquée en carton, et une couverture sur le plancher) et revenir au point de départ. La mission 1 fut avec les deux robots, tandis que la mission 2 s'effectua seulement avec le CoWorker (le Magellan ne pouvant rouler sur une couverture au plancher). Chaque opérateur effectua chacune des missions une seule fois dans chacun des domiciles. Un total de 30 essais a donc été réalisé avec les cinq opérateurs. La durée typique de la mission 1 par l'expérimenté fut de 3 minutes 50 secondes alors que celle de la mission 2 fut de 3 minutes et 42 secondes.

Bien que ce nombre soit insuffisant pour supporter la généralisation des résultats des résultats, notre objectif ici était de faire ressortir des observations préliminaires quant aux interfaces-opérateurs et aux conditions d'opération, ainsi qu'à la méthodologie expérimentale pour ce genre d'expérience. Sur ce point, la métrique d'évaluation choisie pour la performance des opérateurs est celle du temps de mission et correspond à la première métrique d'efficacité défini par Olsen et al. [OLSEN 2003]. Les autres métriques qu'ils ont identifiées sont la tolérance à la négligence, la demande d'attention, le temps libre, la multiplicité de robots et l'effort d'interaction. La comparaison de performances avec des systèmes de téléopération a été rapportée comme étant difficile à établir si les données proviennent d'essais comportant des facteurs de biais différents [KAWAMURA 2003]. Donc, nous avons opté pour exprimer les performances en termes de ratios de temps Rt comparant les mesures des essais des novices et des opérateurs entraînés ($t_{Mission}$) avec celles de l'expérimenté ($t_{expérimenté}$), tels que donnés par l'équation 2-1. Les performances de l'opérateur expérimenté ont été observées avec les mêmes robots et dans les mêmes environnements que les opérateurs entraînés et novices. Cette équation permet de référencer les performances des opérateurs par rapport à celles de l'opérateur expérimenté de façon à enlever des biais provenant des caractéristiques des robots et des conditions de l'environnement.

$$Rt = \left(\frac{t_{Mission}}{t_{expérimenté}} - 1 \right) \times 100 \quad (2-1)$$

L'évaluation de l'utilisabilité des interfaces-opérateurs est aussi importante dans de telles expériences afin d'obtenir une meilleure compréhension de ce qui détermine les opérations sécuritaires et efficaces de robots [JACOF 2000, ENDO 2004]. Donc, après chaque mission, les opérateurs ont répondu à un questionnaire d'utilisabilité du système et de l'interface-opérateur. Ce questionnaire est présenté à l'annexe A.

2.2 Résultats

Le tableau 2.1 présente les résultats de la mission 1 pour les deux sites et les quatre opérateurs. Les opérateurs entraînés sont identifiés par les indices E1 et E2, et les opérateurs novices par les indices N1 et N2. Les sites sont identifiés selon l'ordre dans lequel ils ont été utilisés, soit A et B. Le tableau présente, dans sa partie supérieure, les résultats des opérateurs entraînés pour les deux sites, suivi des valeurs médianes globales correspondantes. Les résultats pour les opérateurs novices sont ensuite présentés de la même façon dans la partie inférieure du tableau. Les colonnes montrent les valeurs du ratio de temps pour chaque système robotique et leur différence de performance relative.

Les valeurs médianes pour le groupe opérateurs entraînés sont de 6,5% avec le CoWorker et de 17,1% avec le Magellan, une différence de 10,6% moins performant avec le Magellan. Les valeurs médianes pour le groupe opérateurs novices sont de 55,3% avec le CoWorker et de 29,6% avec le Magellan, une différence de 30,9% moins performant avec le CoWorker.

TABLEAU 2.1 RÉSULTATS NORMALISÉS POUR LA MISSION 1

Opérateur	Site	<i>Rt</i> CoWorker	<i>Rt</i> Magellan	<i>Différence</i>
E1	A	6,8%	36,3%	29,6%
E2	A	6,3%	17,5%	11,2%
E1	B	10,9%	10,8%	-0,1%
E2	B	0,0%	16,7%	16,7%
	Médiane	6,5%	17,1%	10,6%
N1	A	118,8%	57,3%	-61,5%
N2	A	28,5%	15,8%	-12,7%
N1	B	82,1%	43,4%	-38,7%
N2	B	23,4%	12,8%	-10,6%
	Médiane	55,3%	29,6%	-30,9%

Ces résultats indiquent que les opérateurs entraînés ont des performances proches de celle de l'expérimenté (< 20%) et qu'ils sont meilleurs avec le CoWorker et son interface-opérateur VC utilisant les points de chute qu'avec le Magellan Teleop et son interface-opérateur CC utilisant les points de position. Il est à noter que la pire performance de l'opérateur entraîné 2 dans le site A avec le système Magellan est causée par une difficulté du logiciel du robot à négocier un passage de porte.

Pour les opérateurs novices par contre, nous observons un plus grand écart de performance (> 30%), et en particulier une plus grande difficulté à opérer le CoWorker avec son interface-opérateur VC. Leurs meilleures performances ont eu lieu lors de l'opération du Magellan Teleop, mais ces performances sont quand même plus de deux fois moins bonnes que celles des opérateurs entraînés. Ces résultats suggèrent que les opérateurs entraînés ont eu de meilleures performances avec le CoWorker à cause de la navigation par point de chute dans une modalité VC. Pour les opérateurs novices, c'est plutôt la navigation par point de position dans une modalité CC qui s'avère plus performante. De ces résultats, il n'est pas possible d'identifier précisément ce qui cause cette situation contradictoire car plusieurs facteurs sont en causes : modalités de visualisation, mécanismes de commande, robots, entraînement et types opérateurs.

De plus, la navigation par point de position avec une vue CC serait moins dépendante de l'effet d'entraînement des opérateurs, car la différence observée entre les groupes est significativement plus faible (17,1% pour les opérateurs entraînés versus 29,6% pour les opérateurs novices) comparativement à celle pour la navigation par point de chute avec une modalité VC (6,5% pour les opérateurs entraînés versus 55,3% pour les opérateurs novices). Des captures d'écrans lors des essais ont démontré que la navigation par points de position avec une modalité CC requiert en moyenne trois fois moins de commandes pour réaliser les mêmes parcours, indiquant ainsi une charge cognitive moins élevée. Ceci pourrait expliquer en partie la raison de l'impact de l'entraînement sur la navigation avec la modalité VC par point de chute, qui sollicite plus de commandes pour réaliser les missions.

Le tableau 2.2 présente les résultats pour la mission 2 réalisée avec le CoWorker. Encore une fois, les résultats montrent que les opérateurs entraînés sont plus performants car ils ont une médiane de 25,1% par rapport à l'expérimenté alors que les novices ont une

médiane de 77,2%. Comparant les performances des deux missions avec le CoWorker pour les deux groupes d'opérateurs, le taux de dégradation s'avère à peu près équivalent : les opérateurs entraînés ont eu 6,5% pour la mission 1 et 25,1% pour la mission 2, ce qui occasionne une dégradation de 18,6%. Les opérateurs novices ont eu 55,3% pour la mission 1 et 77,2% pour la mission 2, ce qui occasionne une dégradation de 21,9%.

TABLEAU 2.2 RÉSULTATS NORMALISÉS POUR LA MISSION 2

Opérateur	Site	Rt CoWorker	Médiane Site A	Médiane Site B
E1	A	36,9%	38,3%	
E2	A	39,6%		
E1	B	13,3%		8,4%
E2	B	3,6%		
	Médiane	25,1%		
N1	A	98,2%	96,4%	
N2	A	94,6%		
N1	B	36,6%		48,2%
N2	B	59,9%		
	Médiane	77,2%		

En utilisant l'équation 2-2, il est possible de quantifier la dégradation relative d de chaque groupe d'opérateurs. La dégradation relative se définit comme le facteur supplémentaire de temps requis pour réaliser la mission 2 comparativement à la mission 1.

$$d = \left(\frac{t_{Mission2}}{t_{Mission1}} - 1 \right) \quad (2-2)$$

Les opérateurs novices affichent un taux de dégradation de 0,4 alors que les opérateurs entraînés affichent 2,85. Ceci indique non seulement que la mission avec obstacles est plus exigeante pour les deux types d'opérateurs, mais occasionne un plus grand taux de dégradation des performances pour les opérateurs entraînés que pour les opérateurs novices. Ceci s'explique par le fait que l'entraînement des opérateurs n'a pas porté sur des essais avec obstacles mais seulement sur les déplacements des robots avec les deux interfaces-opérateurs.

Notons aussi que les performances des opérateurs sur le site A sont moins bonnes que pour le site B. Le site A est de type à espaces clos et comporte des corridors, ce qui créait un parcours très bien défini. Le B est à aires ouvertes, ce qui a laissé plus de possibilités de navigation aux opérateurs. Le site A a été utilisé le premier, ce qui a donné aux deux groupes une période d'entraînement non négligeable.

Enfin, les résultats du questionnaire d'utilisabilité ont fait ressortir que les opérateurs préfèrent le système CoWorker et son interface-opérateur VC avec la navigation par point de chute plutôt que le Magellan Teleop et son interface-opérateur CC avec la navigation par point de position, et ceci malgré le fait que les opérateurs novices ont moins bien performé avec le CoWorker. La difficulté perçue par les opérateurs démontre que la navigation par point de chute dans une vue VC est plus difficile à apprendre que celle de navigation par point de position sur une vue CC. Il faut noter que l'interface-opérateur du Magellan Teleop ne requiert que deux boutons pour son utilisation, alors que le CoWorker en utilise quatre. Le CoWorker a été perçu comme étant moins sécuritaire à utiliser dans les domiciles que le Magellan Teleop. Le CoWorker possède une caméra avec un angle de vue de 85° alors que le Magellan Teleop possède un capteur laser de 180° . De plus, il a été mentionné qu'avec le CoWorker, il est fréquent de perdre la vue du point de chute lorsque le robot pivote pour éviter un obstacle.

2.3 Observations générales

La méthode d'évaluation proposée et utilisée pour cette étude pilote semble être une solution intéressante afin d'obtenir des informations pertinentes sur les contraintes de conception de tels systèmes, la qualité des informations obtenues par de telles études étant critique à cette fin [SHOLTZ 2004]. À cause du petit nombre d'essais et d'opérateurs lors de ces expériences, il n'est pas possible de dégager des résultats significatifs pour l'identification de considérations critiques à ce stade-ci, si ce n'est que d'indiquer des pistes qui semblent prometteuses. Au niveau de l'interface-opérateur, il serait intéressant de combiner les avantages de la navigation par point de chute dans une modalité VC avec ceux de la navigation par point de position sur une modalité CC. L'intégration d'une modalité VC avec une CC pourrait permettre de réduire l'impact de l'entraînement des opérateurs, réduire leur effort cognitif et augmenter les performances et la sécurité des missions.

D'une manière générale, il a été observé que la présence de petits obstacles, de corridors et de passages de portes augmentent significativement le niveau de difficulté pour les deux types d'opérateurs, entraînés ou novices. Parmi tous les essais, un seul cas a été répertorié où un opérateur entraîné a réalisé une performance supérieure de 9% à celle de l'opérateur expérimenté. Des améliorations quant aux capacités de locomotion ont aussi été identifiées lors de cette étude, comme la capacité du robot à tourner sur lui-même et l'usage d'une locomotion et d'une suspension mieux adaptée aux environnements domiciliaires afin de faire face aux différentes surfaces, seuil de portes, mobiliers et objets hétéroclites, etc. qui s'y trouvent.

Enfin, ces expériences nous ont confirmé que le référencement des résultats des opérateurs entraînés et novices avec celles quasi-optimales réalisées par un opérateur expérimenté permet d'enlever des biais et de faire ressortir des données pouvant être comparées de façon intéressante. Bien qu'elles soient insuffisantes pour dégager des facteurs clés statistiquement significatifs quant aux modalités de visualisation, les expériences menées lors de cette étude sont donc riches en termes de points à considérer pour la suite de nos travaux.

3 INTERFACES-OPÉRATEURS DE TÉLÉOPÉRATION ROBOTIQUE

Les facteurs qui ont influencé la conception et les performances de nombreuses interfaces-opérateurs de téléopération de robot mobile sont issus de divers domaines de recherche, dont en particulier celui des études de facteurs humains (*Human Factors*) et ceux plus spécifiques d'interaction humain-ordinateur (*Human Computer Interaction*), de l'interaction humain-robot (*Human Robot Interaction*), ainsi qu'en ergonomie [NEWMAN 1995, RASKIN 2000, FONG 2003, SCHOLTZ 2004, CRANDALL 2005].

Appuyé par les pistes identifiées au chapitre 2, l'objectif de ce chapitre est d'identifier dans la littérature scientifique les concepts et les caractéristiques de conception qui sont rapportés dans les domaines de recherches cités plus haut et visant à améliorer la performance d'opérateurs novices dans la téléopération de robots mobiles.

3.1 Concepts importants

La qualité de l'interface-opérateur de téléopération du robot et l'expérience de l'opérateur sont deux facteurs importants ayant un impact direct sur la sécurité et la performance des systèmes. Suite à l'intervention d'une équipe de secours équipée de systèmes robotiques téléopérables lors de la catastrophe du World Trade Center, une équipe de chercheurs [CASPER 2003] a indiqué que l'interface-opérateur est un élément critique de la performance des missions de sauvetage. Ces chercheurs ont aussi noté que l'apprentissage des opérateurs avec de tels systèmes est important car les experts peuvent composer avec le stress et la surcharge d'informations jusqu'à un certain degré, alors que des opérateurs novices ou non entraînés ont plus de difficulté.

Un modèle à trois niveaux, illustré à la figure 3.1, a été suggéré par Rasmussen [RASMUSSEN 1983] pour expliquer les différents processus mentaux en jeu lors de la réalisation de tâches de téléopération performante par l'humain. Ce modèle est adopté par plusieurs. Lorsqu'un humain fonctionne au niveau d'habiletés, ses intentions gouvernent les actions et les corrections sont réalisées de façon réflexe ou quasi-automatique, sans effort des niveaux mentaux supérieurs. La performance est visualisée plutôt qu'analysée et contrôlée [RASMUNSSSEN 1982]. Ce modèle décrit la relation entre l'humain et la tâche comme étant distincte de celles entre l'humain et la machine, de même qu'entre la machine et la tâche. Le

processus du premier niveau est caractérisé comme étant à base d'habiletés (*skill-based*), le second à base de règles (*rule-based*) et le troisième à base de connaissances (*knowledge-based*).

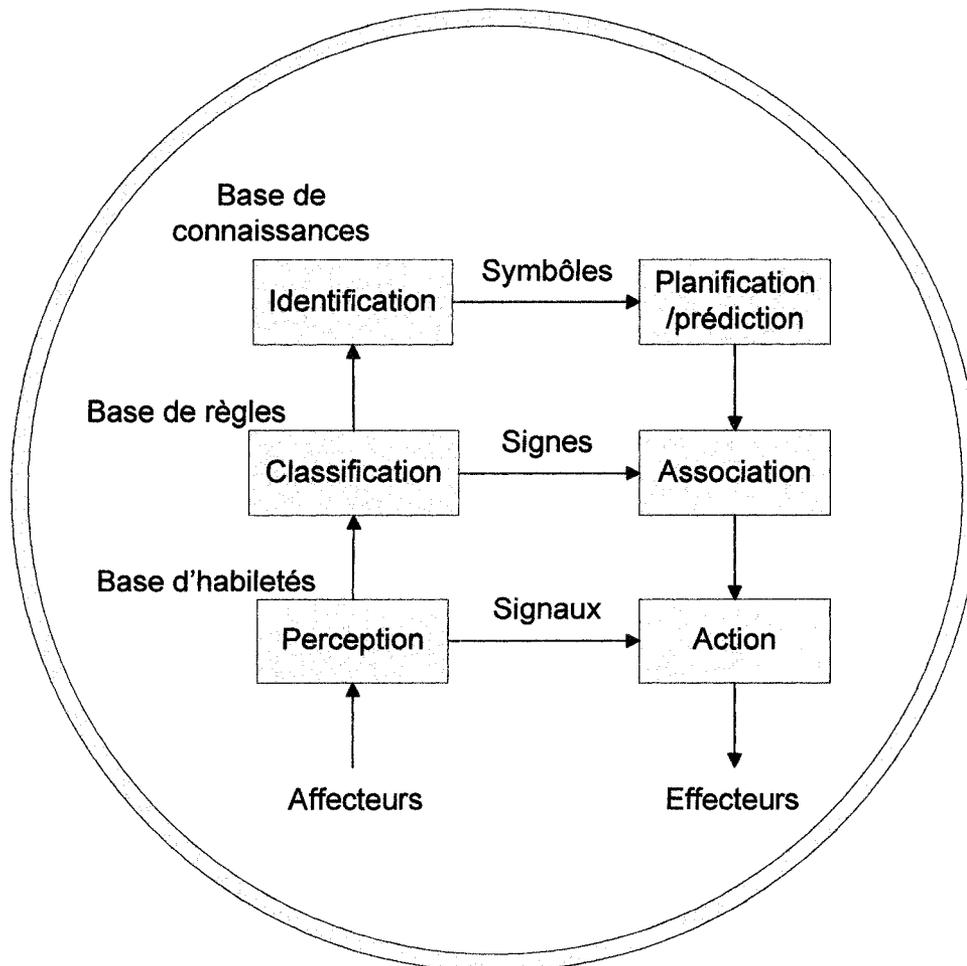


Figure 3.1 Modèle SRK (*Skill-Rule-Knowledge*) de Rasmussen

- Base d'habiletés : À ce niveau les tâches sont assumées par des actions familières et réalisées dans un contexte connu, l'humain fonctionnant en mode automatique.
- Bases de règles : Les tâches sont ici familières à l'humain et utilisent efficacement l'application de règles bien intégrées. Il est pré-requis que la situation soit bien perçue. Le processus est orienté par des raisonnements de type si-alors.
- Base de connaissances : Ce dernier niveau assure les tâches non familières, inhabituelles ou uniques à la personne. Les performances à ce niveau dépendent des

connaissances, des capacités d'analyse et de diagnostic de la personne. Ces tâches sont souvent exercées par un processus d'essai-erreur.

Lorsque l'humain est soumis à une tâche nouvelle, il essaie de la réaliser en puisant dans ses habiletés acquises. Lorsqu'elles ne correspondent pas suffisamment à ses repères, il tente de trouver les règles qui lui permettraient de résoudre le tout et, ultimement, il utilise ses connaissances pour faire face à l'inhabituel, l'inconnu et à l'imprévisible. Lorsque la tâche a été bien exercée, le processus se déplace vers un simple exercice d'habiletés acquises. Par exemple, l'apprentissage de la conduite d'une bicyclette ou d'un véhicule illustre bien ce processus.

En réalisant notre revue de la littérature, nous avons constaté que cette représentation en trois niveaux s'arrimait bien aux concepts cognitifs mis de l'avant pour les systèmes de téléopération. La synthèse de ces transpositions est présentée au tableau 3.1. Nous utilisons ce modèle de répartition de la complexité des capacités cognitives de l'humain de façon à faire correspondre ces niveaux SRK avec ceux de trois autres concepts importants que nous avons répertoriés.

TABLEAU 3.1 CONCEPTS RELIÉS AUX NIVEAUX COGNITIFS

Niveaux de cognition [RASMUSSEN 1983]	Modèle cognitif [GOODRICH 2005]	Conscience de la situation (<i>SA Situation Awareness</i>) [YANCO 2004a-ENDSLEY 1988]	Type de tâches de l'opérateur [WICKENS 2000]
Habiletés (Skill-based)	Espace de travail ou mémoire à court terme	Perception (Perception passive [BAJCSY 1988])	Contrôle de la locomotion, déplacement et positionnement
Règles (Rule-based)	Mémoire à long terme, collection de modèles mentaux : règles	Compréhension (Perception active [BAJCSY 1988])	Compréhension de la situation, robot et environnement
Savoirs (Knowledge-based)	Mémoire à long terme, collection de modèles mentaux : savoirs	Projection (Perception active [BAJCSY 1988])	Planification et anticipation, danger, trajet, et mission

Plus spécifiquement, le modèle cognitif de Goodrich [GOODRICH 2003, 2005] (et se référant au concept d'écologie d'interface-opérateur [VINCENTE 1990]) se base sur deux types de mémoire, l'une à long terme et la seconde à court terme. La mémoire à court terme fait partie d'un espace de travail mental pour l'analyse des perceptions et l'élaboration d'un modèle mental de la situation. Ce modèle mental de l'environnement est défini comme étant :

« ...an internal representation employed to encode, predict, and evaluate the consequences of perceived and intended changes to the operator's current state within a dynamic environment. » [GOODRICH 2005]

Le concept de conscience de la situation, de l'anglais *Situation Awareness (SA)*, se transpose avec les aspects clés de sa définition. Ce concept clé est relié à la fonction de téléprésence dans l'environnement distant et sa perception par l'opérateur. Des chercheurs ont démontré, à partir d'expériences de téléopération dans des environnements virtuels, que les performances à atteindre dans la réalisation de tâches sont dépendantes de la fonction de téléprésence de l'opérateur, ce qui en ferait un critère important de conception pour les interfaces-opérateurs [RILEY 2004, CRANDALL 2005]. L'expérience de téléprésence vécue par l'opérateur lui procure un certain niveau de conscience de la situation distante résultant de la quantité, de la pertinence et de la qualité des informations qui lui sont présentées via le système.

Ce concept de conscience de la situation découle d'une certaine construction mentale de l'environnement distant et des éléments présents, tel que défini par Endsley [ENDSLEY 1988] et récemment adapté par Yanco [YANCO 2004a]. Cette définition correspond : aux perceptions de la localisation du robot, de l'entourage, et de son état; la compréhension de la signification des perceptions; et la projection de comment le robot va se comporter dans un futur immédiat. Cette définition comprend donc trois aspects fondamentaux reliés à des capacités cognitives de l'opérateur : la perception, la compréhension et la projection. Le niveau de conscience de la situation a été identifié comme étant un facteur qui influence la performance des opérateurs lors de missions de recherche et de sauvetage en milieu urbain. Un faible niveau de conscience de la situation a occasionné, durant des compétitions de téléopération de robots, de la confusion chez les opérateurs [YANCO 2004a – DRURY 2003]. D'ailleurs, l'évaluation du taux de conscience est vue comme pouvant aider à mieux comprendre les mécanismes et les caractéristiques des systèmes de téléopération de façon à procurer des opérations sécuritaires et efficaces [KABER 2000]. Un outil d'évaluation basé sur les trois aspects de la conscience de la situation a été développé [SCHOLTZ 2005] et consiste en trois séries de questions, une pour chaque niveau. Nous avons aussi ajouté entre

parenthèses dans le tableau 3.1 une équivalence de classification [BAJCSY 1988] pour les perceptions de types passives et actives.

Enfin, le tableau 3.1 établit le parallèle avec les trois types de tâches (les deux premières ont été énoncées par Wickens [WICKENS 2000]) implicitement requises par un opérateur pour le déplacement et le positionnement sécuritaire et efficace d'un robot mobile téléopéré. Cette distinction permet de positionner le rôle de chacun des niveaux de cognition en fonction d'une graduation des tâches d'un aspect d'efficacité vers un de sécurité. À la base, les habiletés de l'opérateur doivent être suffisantes pour performer avec des tâches de contrôle. Au second niveau, il doit comprendre la situation pour assurer la sécurité. Enfin, il faut être capable de planifier et d'anticiper suffisamment ce qui se passera pour accomplir la mission sans danger.

Cette synthèse met en évidence que la charge cognitive d'un opérateur pour le déplacement et le positionnement de robots téléopérés dans des domiciles se doit d'être minimale. Elle ne devrait faire appel qu'aux habiletés de premier niveau, comme la mémoire et les mécanismes d'analyse à court terme. De cette façon, les capacités de compréhension et d'anticipation sont alors disponibles pour des activités globales et sécuritaires de la mission. L'interface-opérateur de téléopération doit fournir suffisamment d'informations de la situation mais aussi sous une forme où les efforts cognitifs de l'opérateur sont minimisés. Les mécanismes d'interaction, de leur côté, doivent permettre un contrôle de la locomotion en fonction des habiletés acquises de l'opérateur. L'information ainsi présentée doit fournir de façon intuitive une compréhension de la situation et permettre une planification aisée des tâches de téléopération.

3.2 Caractéristiques de conception d'interfaces-opérateurs conventionnelles

Les interfaces-opérateurs de systèmes robotiques téléopérés ont débuté avec l'usage d'images vidéo de la scène provenant d'une caméra montée sur le robot [MONTFERRER 2002]. Ce type d'interface-opérateur est identifié comme étant Vidéo Centrique (VC). Dans la littérature scientifique [MONTFERRER 2002, WOODS 2004], les interfaces-opérateurs qualifiées de conventionnelles sont de ce type.

La difficulté de piloter le robot grâce à un flux d'images vidéo est décrit par des chercheurs comme étant similaire au fait de regarder au travers d'une paille [WOODS 2004].

Ces limitations de perception réduisent la conscience de la situation, ce qui peut mener à de la confusion chez l'opérateur et affecter la sécurité et l'efficacité de la téléopération [YANCO 2004, DRURY 2003]. En mode VC, la conscience de la situation de l'opérateur est fonction de la plage des perceptions possibles pouvant être extraites du flux d'images. L'opérateur doit, par des processus cognitifs particuliers, extraire un modèle tridimensionnel (3D) de l'espace, des objets et du robot à partir d'une projection d'images bidimensionnelles (2D). Ce travail d'extraction de caractéristiques pour l'élaboration d'un modèle mental approprié fait appel à des capacités cognitives de plusieurs niveaux. Elle demande des efforts d'attention et de cognition plus importants que si l'opérateur se déplaçait réellement à la place du robot dans l'environnement en question. L'opérateur doit mobiliser sa mémoire de travail à court terme, de pair avec des capacités cognitives d'analyse complexe et basées sur des règles et des savoirs, pour réaliser de simples tâches de positionnement et de déplacement [GOODRICH 2004].

L'usage de plusieurs caméras pour augmenter l'angle de vue a démontré l'augmentation de la performance des opérateurs [HUGHES 2003 - VOSHELL 2005]. Les effets négatifs d'une restriction de l'angle de vue sont de leur côté des problèmes de locomotion, de référence spatiale, de perception et d'auto-localisation. Les caméras panoramiques ou l'ajout de caméras sont une solution au problème d'angle de vue mais elles imposent une contrainte sur la largeur de bande requise du système de communication [THOMAS 1997].

La position des caméras sur les robots a aussi une influence sur les perceptions des opérateurs. Avec un robot mobile, la caméra est généralement placée à une hauteur du sol d'environ 20 à 40 cm, ce qui procure un point de vue inhabituel pour l'opérateur. Les conséquences de cette situation, dans certaines conditions, peuvent affecter la capacité de l'opérateur à obtenir ou à maintenir un modèle mental 3D précis de la scène et de la situation du robot. Lors de séances de téléopération par des opérateurs novices de robot mobile dans des environnements extérieurs inconnus (surface de mars par exemple), Kanduri et al. [KANDURI 2005] ont d'ailleurs démontré que la perception de la hauteur d'objets distants est généralement surestimée d'environ 192%.

Une interface-opérateur de téléopération doit fournir des informations critiques pour l'opération adéquate et sécuritaire du robot distant [MEIER 1999]. L'ajout de divers senseurs d'obstruction, de positionnement et de localisation comme les senseurs de contact, à infrarouge, à ultrasons, laser, etc. permettent d'enrichir les informations de l'interface-opérateur sur l'occupation des lieux et de ses caractéristiques [MONTFERER 2002]. Des chercheurs ont démontré qu'avec des systèmes complexes comportant plusieurs senseurs, la charge cognitive des opérateurs peut être très grande et peut produire, par conséquent, de la fatigue, du stress et dans certains cas extrêmes mener à l'incapacité à réaliser les tâches demandées [SHERIDAN 1992]. Il faut noter que les informations provenant de fenêtres distinctes et alimentées par des senseurs différents utilisent généralement des métaphores et des degrés d'abstraction différents. Par exemple, une fenêtre complémentaire présentant une carte des lieux avec le positionnement du robot utilise une perspective différente de celle de la vue vidéo. La vue de la carte est aérienne, du haut vers le bas (exocentrique, de l'extérieur vers le robot) et celle des images vidéo est horizontale, du robot vers la scène avant (égocentrique, du robot vers l'extérieur). L'opérateur est donc contraint de balayer chaque zone, d'en interpréter l'information et de les combiner de façon consistante pour obtenir une représentation exacte et complète de la situation. C'est pour cette raison que ce genre de système requière des entraînements intensifs ainsi que de l'expérience dans des domaines connexes pour une opération sécuritaire et efficace. Le bénéfice de l'apport d'informations supplémentaires dissociées du flux vidéo serait alors réduit par la charge cognitive additionnelle pour leur intégration au modèle mental de l'opérateur.

Enfin, l'information de profondeur dans la scène semble essentielle pour assurer un bon jugement spatial chez l'opérateur. De nombreuses erreurs de téléopération ont été attribuées à l'estimation erronée de distance à partir d'images vidéo bidimensionnelles [McGOVERN 1988]. Selon ces chercheurs, ce problème comporte deux aspects clés : premièrement, l'humain n'est pas toujours précis ou consistant pour des jugements de distances absolues; deuxièmement, les perceptions découlant de vues vidéo bidimensionnelles sont limitées. Tout particulièrement, des informations comme la profondeur, la position, les mouvements, les dimensions, les obstructions, les objets et différents plans sont particulièrement affectés. Les mécanismes de focalisation, de convergence et de stéréoscopie sont totalement neutralisés

avec une vue de la scène présentée sur un écran plat. L'opérateur ne peut les utiliser comme il le fait inconsciemment dans ses déplacements dans l'environnement et dans la manipulation directe d'objets. L'opérateur utilise une partie plus restreinte et contraignante d'information qui sont disponibles sur l'écran, en particulier les informations d'ombre, de gradient de texture, d'occlusions, de points de fuite, de ligne d'horizon, de perspectives, de mouvement de parallaxes, etc. Certains de ces mécanismes requièrent un niveau d'analyse cognitive plus élaborés et nécessiteraient par conséquent une charge cognitive plus importante pour la résolution des caractéristiques de position et de situation dans la scène. Toutes ces considérations soulèvent donc la question de la qualité de l'intégration des multiples informations sur un même écran.

3.3 Considérations à prendre pour la conception de systèmes robotiques téléopérés

Six experts en conception de systèmes robotiques téléopérés ont indiqué l'importance de considérer des concepts du domaine de l'interaction humain-machine lors de la conception de systèmes robotiques et de leur interface-opérateur [STEINFIELD 2004]. Leurs commentaires sur les interfaces-opérateurs de téléopération se résument par les trois énoncés suivants :

- La plupart des interfaces-opérateurs pour les systèmes autonomes ou semi-autonomes sont conçus par des roboticiens et pour leur propre usage;
- Elles ne sont pas conçues pour être opérées par des opérateurs non entraînés;
- La majorité des interfaces-opérateurs sont mal conçues.

Un autre groupe de chercheurs [OTT 2005] a fait ressortir que les opérateurs novices et experts n'ont pas les mêmes opinions par rapport à ce qui est utile et utilisable sur les interfaces-opérateurs, ce qui confirme l'importance des facteurs humains pour la conception d'interfaces-opérateurs de téléopération. Les recherches en facteurs humains ont aussi montré que pour concevoir une interface-opérateur utile, efficace et utilisable, il faut inclure tout au long du processus de conception une perspective centrée sur les utilisateurs plutôt que sur l'ingénierie uniquement [ADAMS 2002]. Ce domaine indique aussi que les concepts suivants

doivent être considérés lors de la conception d'interface-opérateur : orientation utilisateurs, prise de décision chez l'humain, charge cognitive, vigilance, conscience de la situation et erreurs humaines.

TABLEAU 3.2 DIRECTIVES DE CONCEPTION DE SYSTÈMES ROBOTIQUES TÉLÉOPÉRÉS ET DE LEUR INTERFACE-OPÉRATEUR

Aspects	SCHOLTZ 2004	YANCO 2004b	GOODRICH 2005	NIELSEN 2005
Modalité de visualisation	<ul style="list-style-type: none"> • Présentation automatisée d'informations contextuelles • Indicateurs d'états du robot, de caméra active et de sa position, de traction et de glissement • Intégration d'information de senseurs différents 	<ul style="list-style-type: none"> • Réduire le nombre de fenêtres • Fusion de senseurs • Fournir de l'information spatiale sur le robot et l'environnement 	<ul style="list-style-type: none"> • Manipuler la représentation plutôt que le robot • Adapter implicitement l'interface et les modes d'autonomie 	<ul style="list-style-type: none"> • Intégration des informations de senseurs différents dans une même fenêtre
Position	<ul style="list-style-type: none"> • Fournir un guide de référence de la position du robot 	<ul style="list-style-type: none"> • Carte de localisation 	<ul style="list-style-type: none"> • Adapter la relation entre robot et environnement 	
Mémoire			<ul style="list-style-type: none"> • Extérioriser la mémoire • Apprentissage 	<ul style="list-style-type: none"> • Faciliter la mémorisation de repères
Opérateur			<ul style="list-style-type: none"> • Ajustement de l'information par l'opérateur • Aide au maintien de l'attention 	<ul style="list-style-type: none"> • Perspective ajustable par l'opérateur selon la tâche
Robot	<ul style="list-style-type: none"> • Capacité d'auto inspection des éléments du robot et de son empêchement 	<ul style="list-style-type: none"> • Automatiser le niveau d'autonomie du robot • Interface-opérateur pour contrôler plusieurs robots simultanément 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation de repères humains par le robot 	

Quatre groupes de chercheurs en robotique ont formulé des directives globales pour la conception de systèmes robotiques téléopérés. Le tableau 3.2 résume leurs recommandations selon cinq aspects. Scholtz [SCHOLTZ 2004] a formulé ces directives à partir de l'analyse de la compétition de recherche et sauvetage urbain (USAR - *Urban Search and Rescue*) lors de *Robotcup 2003*. Yanco et al. [YANCO 2004b] les a formulées à partir de la compétition

USAR lors de l'événement *Robot Rescue Competition* de l'AAAI 2002 (*American Association for Artificial Intelligence*). Goodrich et al. [GOODRICH 2005] ainsi que Nielsen et al. [NIELSEN 2005] l'ont fait à partir de leurs propres activités de recherche. L'aspect qui suscite le plus de recommandations est celui relié à la modalité de visualisation de l'information de l'interface-opérateur. Ceci justifie la pertinence de focaliser nos efforts sur cet aspect.

3.4 Modalités de visualisation de l'information

L'impact des modalités de visualisation sur le niveau et la qualité de la conscience de la situation a été noté par Johnson et al. [JOHNSON 2003] en utilisant une interface-opérateur développée par le groupe de Kawamura [KAWAMURA 2003]. Ceux-ci ont intégré le concept d'égo-sphère sensoriel (SES) [ALBUS 1991] consistant à présenter un système de coordonnées dense autour de l'égo du robot, pour en démontrer l'utilité à augmenter le niveau de conscience de la situation. Cette interface-opérateur comprend autant de fenêtres que de types de senseurs, et dissémine l'information vidéo, de sonar, de laser, de compas et de carte. Ils ont comparé les performances d'opérateurs novices utilisant l'interface-opérateur originale à cinq fenêtres avec celui présentant une vue de l'égo-sphère dans une fenêtre supplémentaire. Ils ont, contrairement à leur attente, démontré que l'ajout de cette vue diminuait les performances, ce qui était selon eux dû à une augmentation de la charge cognitive causée par l'ajout d'une sixième fenêtre à l'interface-opérateur :

« ...a higher demand for necessary thinking, task difficulty, physical efforts and stress level of operators...these finding may be due to the addition of the SES display. » [JOHNSON 2003]

La fragmentation et la dissémination des informations sur différentes fenêtres ou zones de présentation diminueraient par conséquent l'utilisabilité de l'interface-opérateur.

Crandall et al. [CRANDALL 2005] ont identifié que fréquemment la conception d'interfaces-opérateurs de téléopération est guidée par une contrainte de charge de travail de téléprésence et un niveau de conscience de la situation par l'opérateur. Les techniques reconnues pour améliorer ces faiblesses sont nombreuses : la fusion de senseurs, les affichages ajustables, les affichages avec mémorisation d'informations, la réalité virtuelle, les affichages

prédictifs et la réalité augmentée. D'autre part, des techniques d'assistant intelligent d'interfaces et les interfaces qui apprennent des opérateurs sont aussi envisagées pour augmenter leur utilisabilité.

La téléprésence est réalisée lorsqu'une interface-opérateur procure une illusion de présence physique dans un endroit distant. Elle est universellement reconnue comme pré-requis pour une téléopération manuelle directe. Le degré d'immersion réalisé par les interfaces-opérateurs peut être très partiel, comme par exemple un simple point sur une carte ou encore une vue vidéo 2D de la scène (e.g., Carte Centrique). Il peut, à l'autre extrême, utiliser une immersion complète en réalité virtuelle ou augmentée avec des interfaces haptiques.

La réalité virtuelle a été introduite afin d'enrichir les vues présentées à l'opérateur, dont en particulier la représentation 3D de la scène et des éléments qui s'y trouvent. Dans une définition plus restrictive, elle correspond à la synthèse d'un espace 3D de pair avec un mécanisme d'interaction et de commande à retour de force (haptique). Lorsqu'elle est définie de façon plus élargie (e.g., environnement virtuel, espace synthétique), elle exclue d'une part les mécanismes haptiques et d'autre part couvre des situations où la modélisation peut être très simple, comme dans le cas extrême d'une communication téléphonique [STEUER 1992]. L'usage d'informations de l'environnement réel et de ces entités pour alimenter la modélisation (construction et comportement) de la réalité virtuelle est qualifié plutôt de réalité mixte [MILGRAM 1995]. On retrouve deux variantes de réalité mixte : la **réalité augmentée** (RA) qui consiste généralement en images vidéo réelles auxquelles s'ajoute de l'information modélisée, textuelle, graphique ou visuelle; la **virtualité augmentée** (VA) est celle où s'ajoute de l'information réelle selon une certaine correspondance au modèle 3D de synthèse [DRASCIC 1996] (figure 3.2). La figure 3.2 présente schématiquement l'étendu des réalités mixtes (zone hachurée) qui incorpore la réalité et la virtualité augmentées et exclut les aspects purement réel ou virtuel (cercle blanc).

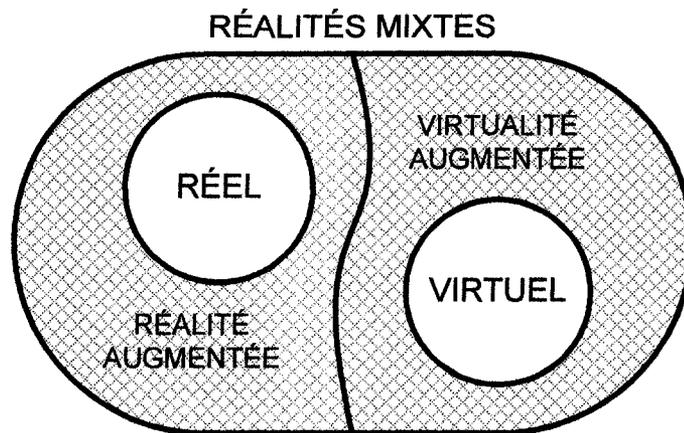


Figure 3.2 Réalités mixtes

L'intégration de données provenant de senseurs de distance et de localisation pour réaliser une carte 3D en réalité virtuelle est de plus en plus accessible. La recherche de méthode d'intégration cohérente de vues vidéo de la scène en temps réel avec une carte en réalité virtuelle est identifiée comme une piste de solution pour le problème de réduction de la charge cognitive de l'opérateur. Goodrich et al. [GOODRICH 2005] ont utilisé la virtualité augmentée qui consiste à augmenter une vue en réalité virtuelle d'une vue vidéo de la scène. Ils avancent l'hypothèse que l'opérateur est sollicité avec les interfaces-opérateurs conventionnelles multifenêtres à fonctionner par bases de règles et de connaissances plutôt que par habiletés, ceci à cause du fait que la restriction et la mauvaise intégration des informations de plusieurs senseurs les forcent à fournir des efforts mentaux non habituels pour fabriquer et maintenir un modèle mental approprié de la situation. On sait depuis les débuts de l'automobile que la conduite de véhicule est une tâche perceptive basée sur des habiletés plutôt que sur des règles ou de la connaissance [GOODRICH 2005]. Cette perspective limitée qu'offre chacune des fenêtres d'une l'interface-opérateur multifenêtre force l'opérateur à utiliser de façon compensatoire des capacités de haut niveau cognitif pour traduire, combiner, interpréter et ainsi reconstruire des situations que l'interface-opérateur ne peut lui permettre de percevoir directement. Ils recommandent de coupler de façon plus intime et adéquate les informations provenant des senseurs dans une vue intégrée pour permettre la réduction de la charge cognitive de la navigation du robot. Ils ont introduit l'idée de l'utilité potentielle de l'intégration d'une vue vidéo égocentrique avec des informations d'une carte de grille

d'occupation fabriquée à partir de données d'un détecteur laser de distance. Cette technique facilite la perception simultanée par l'opérateur de la pose du robot et des informations sur l'environnement où se trouve le robot. Leur approche se base sur le concept de conception écologique de Gibson [GIBSON 1979] appliqué aux interfaces-opérateurs de téléopération. Cette approche a comme but d'exploiter les perceptions et capacités d'action de l'opérateur pendant les activités de résolution de problèmes. Elle consiste donc à réaliser des interfaces-opérateurs comportant des indications supplémentaires obtenues par prédiction, extrapolation ou par synthèse, en plus de celles généralement directement observables comme par exemple présenter le devant du robot, la tête (le mécanisme de positionnement de la caméra, inclinaison), les yeux (zoom), les orteils (terrains, textures, roues, trous, etc.).

La réalité virtuelle permet donc d'introduire des dimensions nouvelles dans la présentation de l'information à l'opérateur en permettant entre autres un contrôle étendu du point de vue dans l'environnement de façon à présenter les vues les plus diverses et les mieux appropriées à la tâche. La dépendance à un signal vidéo continu de qualité de la scène pour la téléopération est contraignante [TROUVAIN 2003]. Un groupe de chercheurs a démontré qu'en utilisant un bon modèle 3D simulé de l'environnement pour l'interface-opérateur, il est possible de réduire le nombre d'erreurs de l'opérateur tout en minimisant la bande passante requise de communication [BRUEMMER 2005]. La bande passante requise pour la transmission d'images vidéo est de beaucoup plus importante que celle requise pour la transmission d'informations de localisation et d'état du robot. Une simple extrapolation à partir de la localisation, la distance des obstacles et la vitesse du robot permet de maintenir la téléopération d'un robot sur une carte ou avec un modèle 3D de l'environnement.

Un modèle virtuel 3D procure de l'information supplémentaire et peut permettre de stabiliser la téléopération. Un groupe de chercheurs a montré qu'une interface-opérateur en virtualité augmentée 3D, qui permet de visualiser l'angle de vue d'une caméra ajustable PTZ (*Pan, Tilt, Zoom*) et sa position relative à celle du robot, améliore substantiellement la performance de l'opérateur tout en diminuant la charge de travail [NIELSEN 2005]. Mais ceci peut aussi occasionner des problèmes de perception si des décalages se produisent avec la réalité. Des expériences de télémanipulation d'objets ont démontré que de petites valeurs de décalage sont facilement compensées par les opérateurs. Par contre, au-delà de certaines

valeurs limites, le temps d'achèvement de tâches et la fatigue de l'opérateur augmentent rapidement [THOMPSON 2000]. Ce genre de décalage apparaît suite à des délais importants de captation, de temps de traitement et de communication des informations présentées à l'interface-opérateur.

La fusion de données de senseurs à une interface-opérateur de téléopération a été utilisée par Meier et al. [MEIER 1999] pour l'amélioration de l'opération. Ceux-ci ont démontré que la fusion de senseurs permettait de créer des interfaces-opérateurs de visualisation pouvant simplifier l'interaction humain-machine. La stratégie vise à fusionner les informations de multiples senseurs et de les présenter de façon à ce que l'opérateur perçoive rapidement ce qui est important pour la tâche. Ils ont utilisé la fusion d'informations de différents senseurs pour améliorer la téléopération et ont démontré qu'elle améliorait l'estimation de distance et la détection d'objets rapprochés par l'opérateur en plus de permettre l'amélioration d'une carte d'occupation des lieux (*grid based map*). La stratégie qu'ils ont utilisée consiste à sélectionner des senseurs complémentaires, à combiner les informations de façon appropriée et de concevoir une présentation efficace de la fusion. Les deux aspects importants de la fusion d'informations de senseurs différents sont la détermination de points de correspondance (regISTRATION) où les informations redondantes doivent être synchronisées, et la complémentarité des informations permettant une mise en commun de l'apport de chaque senseur. L'optimisation de la présentation des informations visuelles est une avenue pour minimiser la charge cognitive de l'opérateur tout en augmentant l'efficacité de la réalisation de tâches de déplacement et de positionnement de robots téléopérés. Selon [THOMPSON 2000], un modèle virtuel 3D procure de l'information supplémentaire à l'opérateur.

Selon le type de points de vue (aussi qualifiés de perspectives) fourni par l'interface-opérateur, Wang et al. [WANG 2001-2004] ont identifié trois options pour la présentation d'informations de localisation, d'orientation et de l'environnement d'un robot téléopéré :

- **Égocentrique** : l'environnement est présenté d'une perspective intérieure au robot vers l'extérieur. Cette option correspond à la vue obtenue en conduisant un véhicule ou à partir d'une caméra fixée sur un robot et pointant vers l'avant.

- **Exocentrique** : l'environnement et le robot sont présentés d'un point de vue extérieur. Une vue aérienne de la scène et du robot correspond à ce mode.
- **Perspectives mixtes** : l'interface-opérateur présente plusieurs perspectives de façon simultanée. Une version simple consiste à le faire à partir de fenêtres distinctes. Par exemple, une fenêtre présente une vue égocentrique (ex. : images vidéo de la caméra du robot) et une seconde une vue exocentrique (ex. : position du robot dans une carte). Cette option peut aussi faire l'objet d'une intégration ou d'une fusion plus poussée des informations avec un mécanisme de référence entre les perspectives. Ceci vise à faciliter les perceptions de l'opérateur et ainsi diminuer ses efforts cognitifs pour avoir une conscience de la situation appropriée. L'affichage d'horizon et d'inclinaison artificiels intégrés à une vue vidéo sur un écran d'avion est un exemple, qualifié de perspective mixte référencée. Lors de téléopération sur des terrains non-uniformes, il a été démontré qu'une interface-opérateur de téléopération de présentation à perspectives mixtes avec une référence gravitationnelle de la scène combinée à des informations de situation du robot [WANG 2004] améliorerait la perception de la situation du véhicule par l'opérateur. L'inclusion du châssis dans la vue de la scène et l'inclinaison de la vue vidéo proportionnellement à celle du robot permet de réaliser ce mode.

3.5 Classification des modalités de visualisation

Dans la littérature, une certaine confusion règne par rapport à la classification des interfaces-opérateurs de téléopération. Ceci vient du fait que les interfaces-opérateurs comportent deux aspects importants mais dissociés : les modalités de visualisation de l'information d'une part, et les mécanismes de commandes de l'autre. Ici nous traitons que de la première.

Les modalités de visualisation sont regroupées en deux grandes catégories selon leur élément principal de visualisation : Vidéo Centrique (VC) ou Carte Centrique (CC). L'élément principal d'une interface VC est basé sur le flux vidéo, tandis que pour une interface CC une carte des lieux est l'élément principal. La modalité Vidéo Centrique offre une perspective égocentrique alors que la Carte Centrique offre divers degrés d'exocentricité. Chacune de ces catégories se divisent selon l'ajout ou non d'éléments provenant de la réalité virtuelle, ce qui

donne des interfaces de type augmentée (RA) pour les VC, ou de type virtualité augmentée (VA) pour les CC (elles sont identifiées dans la littérature comme étant de perspective mixte). Les éléments de réalité virtuelle ajoutés peuvent se faire en 2D, 2½D, 3D ou même en stéréoscopie (ou 3DS).

Les interfaces dites conventionnelles présentent un mode principal de visualisation accompagné ou non de modes secondaires en périphérie et de moins grande dimension (tableau 3.3). Il existe différents types d'interfaces VC selon le type d'informations visuelles retournées (2D, 3D, 3DS) et la présence de fenêtres secondaires (montrant d'autres informations comme une carte de position, les lectures de capteurs, etc.). Les mêmes variantes s'appliquent aux interfaces de type CC.

TABLEAU 3.3 CATÉGORIES D'INTERFACES-OPÉRATEURS CONVENTIONNELLES

Modalité	Type	Description
Vidéo centrique	VC2D	Vidéo centrique en 2D, e.g., CoWorker
	VC2DMF	Vidéo centrique 2D multifenêtres (plus de trois fenêtres affichant l'état des senseurs) (Interface de l'INNEL [BAKER 2004])
	VC3DS	Affichant une vue stéréoscopique 3D
Carte centrique	CC2D	Carte centrique en 2D, e.g., Magellan
	CC2DMF	Carte centrique 2D multifenêtres (plus de trois fenêtres affichant l'état des senseurs)
	CC2½D	2½D, 3D ou stéréoscopique 3DS
	CC3D	
CC3DS		

Comme le montre le tableau 3.4, de telles variantes se retrouvent aussi chez les interfaces de réalité mixte (RA ou VA). Une interface de type VC se transforme en RA par l'ajout de texte, d'éléments graphiques ou d'informations d'autres sources par superposition, insertion, transformation ou fusion (e.g., mires, cibles, repères, trajets sur le sol). Une interface CC devient VA par l'ajout d'informations d'autres capteurs (vidéo, etc.). Plus spécifiquement, l'insertion d'éléments provenant d'un flux vidéo dans la carte permet de créer une vue de type mixte à prédominance exocentrique (ME).

TABLEAU 3.4 CATÉGORIES D'INTERFACES-OPÉRATEURS AMÉLIORÉES

Modalité	Type	Description
Vidéo centrique	RA2D	Réalité augmentée en 2D [BAKER 2004, OTT 2005, KEYES 2006, DRURY 2007]
	RA3D RA3DS	Réalité augmentée en 3D [LABONTÉ 2007] ou stéréoscopique 3DS [FONG 2001, MONTFERRER 2002]
Carte centrique	ME2D	Mixte exocentrique en 2D
	ME2½D	Mixte exocentrique en 2½D [RICKS 2004, BRUEMMER 2005, DRURY 2007], 3D [LABONTÉ 2007] ou stéréoscopique 3DS
	ME3D ME3DS	

Enfin, les modalités de type Carte Centrique peuvent aussi mener à de la Réalité Augmentée en présentant une carte soit en 2D, 2½D, 3D ou 3DS, avec une représentation du robot se déplaçant dans l'environnement selon les informations réelles de sa localisation. La perspective est par conséquent exocentrique et selon divers degrés en fonction du point de vue utilisé. Lorsqu'on ajoute un flux vidéo d'images en provenance d'une caméra sur le robot, dans un cadre inséré ou présenté simultanément à la carte, il en résulte une perspective Mixte à prédominance Exocentrique (ME). Cette situation implique aussi une condition de Réalité Mixte.

3.6 Études comparatives d'interfaces-opérateurs

Il s'avère aussi utile de considérer les modalités et les résultats d'études comparatives rapportés dans la littérature sur le domaine des interactions humain-robot pour la conception d'interfaces-opérateurs. Une première étude réalisée par Baker et al. [BAKER 2004] a servi à qualifier subjectivement la facilité d'utilisation de leur nouvelle interface-opérateur par des experts, en fonction de leur expérience personnelle avec d'autres interfaces-opérateurs. La deuxième étude compare deux points de vue de caméra avec une même interface-opérateur améliorée [KEYES 2006]. Enfin, trois autres [RICKS 2004, BRUEMMER 2005, DRURY 2007] comparent leur interface-opérateur améliorée avec une conventionnelle de type VC2D. Le tableau 3.3 présente un sommaire des conditions expérimentales de ces cinq études. Les deux premières utilisent des interfaces-opérateurs de type réalité augmentée (RA2D) selon une perspective vidéo centrique (VC2D). Les trois autres sont de type mixte exocentrique

(ME2½D) selon une perspective carte centrique (CC) et où elle utilise des constructions d'objets virtuels en 2½D car l'information verticale utilisée est une valeur fixe. Les deux premières études n'ont pas un nombre statistiquement significatif d'opérateurs ou d'essais, ce qui diminue la valeur des résultats obtenus. Par contre, la troisième et quatrième comportent des échantillons importants d'opérateurs, et la cinquième comporte un nombre important d'essais avec 8 opérateurs.

TABLEAU 3.5 ÉTUDES COMPARATIVES

Étude	Interface-opérateur	Nb Opérateurs	Type d'opérateurs	Nb essais par opérateur	Comparaison
BAKER 2004	RA2D	5	Experts	nd	Subjective selon l'expérience des opérateurs
KEYES 2006	RA2D	19 (9 hommes, 10 femmes)	nd	2	Deux points de vue de la caméra
RICKS 2004	ME2½D	32	Expérience minimale	2	VC2D et ME2½D
BRUEMMER 2005	ME2½D	64	Grand public	2	VC2D et ME2½D
DRURY 2007	ME2½D	8 (7 hommes, 1 femme)	nd	24	VC2D et ME2½D

Le tableau 3.4 présente les résultats obtenus de ces études. Les métriques utilisées pour ces expériences sont différentes dans la plupart des cas ce qui rend très difficile la comparaison des résultats entre chaque étude.

L'étude de Baker et al. [BAKER 2004] porte sur une interface de type réalité augmentée vidéo centrique. Cette interface comporte une fenêtre présentant des images vidéo de la scène devant le robot autour de laquelle sont disposés des rectangles de couleurs indiquant la présence d'obstacles. À droite de cette fenêtre se trouve une carte d'occupation tracée selon les informations retournée par les senseurs de distance. Au-dessus est affiché une vue vidéo réduite de l'arrière du robot pour simuler une fonction de rétroviseur. Enfin, une fenêtre en haut à droite présente des indicateurs d'états. Cette interface-opérateur fut soumise à des tests de téléopération avec cinq opérateurs qui ont subjectivement énoncé qu'elles étaient facile à utiliser. Keyes et al. [KEYES 2006] ont comparé cette même interface-

opérateur avec deux configurations de position de caméra sur le robot. La première configuration est de type égocentrique avec la caméra sur le robot à 30 cm du sol, dirigée vers l'avant sans permettre de voir le robot. La seconde configuration consiste à placer la caméra à environ un mètre du sol, légèrement vers l'arrière du robot, dirigée vers l'avant mais en plongée de façon à inclure la moitié avant du robot. Il en résulte une vue légèrement exocentrique. Deux métriques sont utilisées dans l'étude : le temps d'exécution des tâches, et le nombre de collisions. Dix-neuf opérateurs, neuf hommes et dix femmes de 18 à 45 ans, ont utilisé les deux interfaces-opérateurs. La métrique de temps n'a pas permis d'obtenir de résultats significatifs. Par contre, pour le nombre de collisions, l'étude démontre une réduction significative de la moyenne de collisions de 4,6 à 1,3 pour l'interface-opérateur avec le point de vue en plongée. La présentation de la partie avant du robot et des éléments s'y trouvant de part et d'autres procure une perspective légèrement exocentrique et élargie l'angle de vue de l'opérateur. Ceci rejoint les observations de Wang et al. [WANG 2004] qui avait identifié qu'une telle perspective améliorerait la perception de la situation par l'opérateur, ce qui a un impact sur la réduction des collisions.

Les études de Ricks, Bruemmer et de Drury recensées au tableau 3.4 sont de type Carte Centrique avec Virtualité Augmentée, soit ME2½D. Un exemple de ce type d'interface-opérateur consiste à générer un modèle grossier des obstacles que le robot rencontre dans son environnement. La technique utilisée consiste à générer des petits volumes rectangulaires ou cylindriques (barils ou boîtes) du sol à la ligne de détection du senseur de proximité, pour former des îlots ou murets selon la grosseur des obstacles. Ces éléments visuels sont alors positionnés et mémorisés sur la carte. Cette technique de visualisation utilise un engin 3D mais correspond plutôt à un rendu en 2½D car les données dans l'axe de l'élévation sont réduites à une valeur constante. La vue vidéo avant du robot (égocentrique) est alors insérée dans un cadre qui flotte en face du robot. Selon l'implémentation, la vue peut aller de légèrement exocentrique (la caméra se trouve à l'arrière du robot et légèrement en plongée pour voir le robot) à fortement exocentrique (où la vue est beaucoup plus élevée et donne une perspective plus globale de l'environnement). Dans ces configurations, les perspectives sont dites mixtes car le cadre des images vidéo est égocentrique et le modèle exocentrique. Ce type

d'interface-opérateur est par conséquent mixte en réalités et en perspectives avec une prédominance sur la vue exocentrique que procure la carte en 2½D.

Plus spécifiquement, Ricks et al. [RICKS 2004] utilise une interface-opérateur de type ME 2½D où la vue vidéo est positionnée en haut de l'écran et le modèle virtuel dans la partie inférieure. Leur implantation incorpore une particularité qui consiste à faire pivoter légèrement la vue vidéo de gauche à droite lors de la rotation du robot afin d'indiquer le sens du mouvement exécuté. Ils ont donc comparé les performances de l'usage de cette interface-opérateur avec une interface-opérateur conventionnelle vidéo centrée à multifenêtres (vidéo, carte, senseurs lasers, senseurs ultrasons, indicateurs). Un groupe de 32 opérateurs ayant une expérience minimale avec des systèmes de téléopération a fait les essais de comparaison dans des parcours virtuels. L'interface-opérateur ME2½D a améliorée les performances du groupe de 17% en termes de temps d'exécution des tâches. Il fut aussi noté que les opérateurs préféraient 80% plus souvent l'interface-opérateur ME2½D.

L'étude de Bruemmer [BRUEMMER 2005] porte sur des expériences entre une interface-opérateur ME2½D et une interface-opérateur Vidéo Centrique conventionnelle. Leur interface-opérateur comporte deux particularités qui les distinguent des autres. La première consiste à insérer, en plus du flux d'images vidéo avant du robot, des images de captures prises de différentes positions sur la carte afin de servir de référence pour l'opérateur. La deuxième ajoute un mécanisme permettant l'ajustement par l'opérateur du point de vue permettant de passer d'un mode égocentrique à un mode très exocentrique. Pour leurs expériences, ils ont utilisé leur interface-opérateur ME2½D en mode réalité virtuelle où le flux vidéo est enlevée pour la comparer à une interface-opérateur ne comportant que le flux vidéo de la caméra sur le robot. Un groupe de 64 opérateurs de 12 à 60 ans du grand public a réalisé des essais d'exploration par téléopération. Trois métriques ont été utilisées pour mesurer les performances relatives des interfaces-opérateurs : la réalisation des tâches, la charge de travail estimée par le nombre de messages de commande provenant du joystick, et enfin la perception de facilité d'utilisation de l'interface-opérateur par les participants. Ils n'ont pas trouvé de différence significative avec la métrique de réalisation de tâches. Pour la métrique de charge de travail, l'interface-opérateur a réduit la charge moyenne d'environ 19%. Enfin, l'opinion

moyenne des opérateurs est que l'interface-opérateur améliorée leur procure un meilleur sentiment de contrôle (2,2%).

L'étude menée par Drury [DRURY 2007] a consisté à réaliser des comparaisons avec leur propre interface-opérateur ME2½D. Leur interface-opérateur se distingue par l'ajout d'éléments textuels et graphiques qui sont superposés à la fenêtre de présentation. Dans le coin inférieur gauche, une carte d'occupation générée par un capteur de balayage laser a été ajoutée. Cette interface-opérateur fut comparée à une interface-opérateur Vidéo Centrique multifenêtres. Cette interface-opérateur comportait, en plus du flux vidéo, une représentation schématique de la présence d'obstacles autour du robot dans sa partie inférieure, une carte d'occupation, une vue vidéo arrière du robot en position de rétroviseur et des éléments indicateurs d'états. Leurs expériences avaient comme but de comparer des modalités de présentation Carte Centrique (par l'interface-opérateur ME2½D) et Vidéo Centrique. Huit opérateurs, sept hommes et une femme âgés entre 25 et 60 ans ont réalisé 100 essais avec l'interface-opérateur ME2½D et 92 avec celle de type VC2D. La métrique qu'ils ont utilisée se base sur les cinq caractéristiques qu'ils ont identifiées en rapport au concept de conscience de la situation (localisation, activités, environnement, états, mission globale). Ils ont trouvé que l'interface-opérateur ME2½D est plus efficace pour la conscience de la localisation et que l'interface-opérateur VC2D est plus efficace pour celle de l'environnement et des activités.

Enfin, nous avons aussi recensé deux interfaces-opérateurs qui utilisent la réalité virtuelle en mode 3D, mais aucune comparaison de leur performance n'est rapportée. Le premier est dans le domaine de l'exploration spatiale où la réalité virtuelle est utilisée pour fournir une vue exocentrique élaborée de l'environnement. Cette interface-opérateur a été développée par la NASA (NASA Ames) [FONG 2001] pour réaliser un rendu des obstacles et du terrain autour du robot. Le second cas est celui d'une interface-opérateur de téléopération de robot pour le travail collaboratif sous l'eau [MONTFERRER 2002].

3.7 Problématique de recherche

Les résultats présentés à la section 3.6 permettent de croire que l'usage de la réalité virtuelle avec des interfaces-opérateurs de types VC ou CC améliorent dans certaines conditions les performances de téléopération. Par contre, à cause des différentes conditions et

métriques utilisées de façon non uniforme dans les études répertoriées, il est pratiquement impossible de dégager des facteurs précis de conception.

Comme améliorations possible, l'usage d'un modèle précis en 3D plutôt que 2½D pour la réalité augmentée dans l'interface-opérateur serait une piste intéressante à étudier et plus spécifiquement sous deux aspects :

- Utiliser et positionner le modèle 3D présentant le même point de vue que les images de la vue vidéo centrée mais avec un angle de vue élargi. Les images vidéo seraient superposées au modèle avec une certaine transparence pour permettre la correspondance des éléments visuels, réalisant ainsi une interface-opérateur de type RA3D.
- Utiliser et positionner le modèle 3D dans une perspective carte centrée positionnée en rapport à une représentation virtuelle du robot simultanément à une vue vidéo réelle de la scène. Cette interface-opérateur serait de type ME3D.

La problématique du projet implique d'évaluer dans un contexte sécuritaire et efficace les performances de téléopération d'opérateurs novices. L'aspect sécuritaire de la téléopération est une contrainte qui implique les personnes, l'environnement où évolue le robot ainsi que l'intégrité du robot lui-même. L'efficacité de la téléopération porte sur la capacité de l'opérateur à déplacer et positionner rapidement et efficacement le robot pour que les équipements de télésurveillance embarqués (audio et vidéo conférence) soient bien positionnés en fonction de la tâche et de la personne sous surveillance. Les expériences prévues dans le cadre de ce doctorat ont comme but de répondre à la question suivante :

Est-ce que les améliorations proposées au niveau de l'interface-opérateur en termes d'intégration de la visualisation de l'information vidéo avec un modèle 3D de l'environnement améliorent les performances d'opérateurs novices pour la téléopération d'un robot mobile ?

L'hypothèse de recherche suggère par conséquent que les améliorations ciblées concernant les modalités de visualisation permettent d'améliorer les performances

d'opérateurs novices par rapport à une interface-opérateur VC2D de type conventionnel. La complexité sous-jacente à cette question suggère d'adopter une approche incrémentale en rapport aux activités expérimentales mises en action de façon à faire une distinction entre fonctionnalités, performances et opérabilité du système avec différents types d'opérateurs. Des tests spécifiques pour chacune de ces activités sont réalisés pour répondre à cette question, tels que couverts dans les chapitres 4, 5 et 6.

4 SYSTÈME ROBOTIQUE TÉLÉOPÉRÉ

Un système robotique téléopéré se compose de trois éléments principaux : le robot mobile distant, le lien de communication et l'interface-opérateur de téléopération. Ce chapitre présente dans un premier temps les principales caractéristiques du système robotique développé pour notre projet. Par la suite, les principales fonctionnalités de la nouvelle interface-opérateur y sont présentées ainsi que celles reliées à l'outil intégré d'évaluation des modalités de visualisation. Enfin, ce chapitre se termine par une série de tests qui permettent de caractériser le fonctionnement du système et ses performances.

4.1 Plate-forme robotique

Un robot spécialement conçu pour des applications de télésoins et de télésurveillance dans des environnements domiciliaires a été développé et construit simultanément au développement de l'interface-opérateur [CLOUTIER 2007, MICHAUD 2008]. La figure 4.1 présente ce robot qui se nomme Télérobot. Le robot est équipé d'une tourelle qui comporte un plateau portant un système de visiophonie pour la communication bidirectionnelle d'un intervenant avec la personne sous surveillance. Le système comporte aussi une seconde caméra haute résolution au-dessous du plateau. Cette caméra permet à l'aide de contrôle PTZ d'observer des points précis dans l'environnement.

La base du robot est circulaire et comporte deux roues motrices latérales lui permettant de tourner sur place. Cette caractéristique est très utile pour un environnement domiciliaire où il faut pouvoir orienter le robot et ses caméras dans n'importe quelle direction avec le minimum de commandes et de déplacements. Cette particularité évite aussi de fournir une fonction de reculons qui peut s'avérer moins sécuritaire en présence de personnes. Un mécanisme de suspension à compensation différentielle est intégré à la partie motrice de ce robot pour faciliter le déplacement sur des surfaces comportant de légères dénivellations comme les seuils de portes, tapis, etc. Ce système diminue les perturbations transmises aux composants du robot lors de déplacements sur diverses surfaces. Cela permet entre autres d'avoir des images vidéo plus stables durant les déplacements du robot.

Cette base est équipée de nombreux senseurs de présence et de distance pour détecter les obstacles autour du robot. Ces senseurs sont de trois types : ultrasons, infrarouge et de contacts. Des senseurs de type infrarouge sont aussi placés sous le robot et

devant les roues motrices de façon à détecter des trous dans le plancher. Ceci permet d'arrêter le robot et d'éviter des chutes. Un capteur de balayage laser (manufacturé par SICK) permet au robot d'obtenir un tracé horizontal de la distance des objets sur 180 degrés au devant du robot, avec 0,5 degré de précision. La localisation et le positionnement du robot sont réalisés grâce au logiciel CARMEN (*Carnegie Mellon navigation toolkit*) [MONTEMERLO 2003] qui utilise les données d'odométrie et du capteur de balayage laser. Le logiciel CARMEN ainsi que les différents modules de contrôle du robot interagissent grâce au logiciel d'intégration et de communication MARIE [CÔTÉ 2004]. L'architecture de contrôle du robot est de type comportemental et comprend les fonctionnalités requises pour la téléopération du robot [CLOUTIER 2007]. La vitesse linéaire maximum du robot est de 25 cm/sec et la vitesse de rotation est fixée à 28 degrés/sec. Une troisième caméra de type standard Quick Cam Pro est positionnée à 28 cm du sol, sous le capteur laser. Cette caméra sert exclusivement à l'interface-opérateur de téléopération pour le déplacement du robot.



Figure 4.1 Télérobot

Dans le but de faciliter l'évaluation des modalités de l'interface-opérateur avec un mode de commandes par joystick, un mode sécuritaire d'évitement d'obstacles a été implanté. Il consiste à ralentir et à arrêter le robot devant un obstacle. La raison justifiant l'utilisation de ce mode particulier plutôt qu'un mode de contournement assisté ou autonome du robot est de solliciter l'opérateur à exécuter les commandes de contournement dans les expériences prévues afin de mesurer leurs performances, et ainsi évaluer l'impact des modalités lors de la téléopération.

L'interface-opérateur roule grâce à un ordinateur portable muni d'un processeur Centrio de 1,6 Ghz et utilisant le système d'exploitation Windows XP. L'ordinateur utilise un lien de communication sur le réseau local Ethernet à 100 Mbps pour accéder au serveur du robot par une passerelle Linksys sans fil 802.11b à 10 Mbps. L'ordinateur de bord du robot utilise un système d'opération LINUX. Deux ports bidirectionnels de communication sont utilisés, un port pour les messages de commandes et d'états (*portCS*) et un autre pour la transmission des images vidéo et de son (*portAV*).

Le robot et le poste de l'opérateur communiquent les informations de commandes, d'états et de la vidéo en utilisant un protocole haut niveau spécialement développé pour la présente application et qui transige au-dessus du protocole TCP/IP [LABONTE 2006b]. Ce protocole permet entre autres au robot de transmettre à un taux fixe des informations de positionnement du robot dans l'environnement. Ces informations de positionnement sont utilisées par l'interface-opérateur pour positionner le robot de façon appropriée sur la carte et dans le modèle 3D de l'interface-opérateur.

4.2 Interface-opérateur de téléopération

Tel que discuté dans les chapitres précédents, l'interface-opérateur est un élément important dans les applications de robotique mobile téléopérée car il permet d'introduire un humain dans la boucle de contrôle et de surveillance. Le robot fournit des informations sur son fonctionnement à l'interface-opérateur, qui les traite et les présente à l'opérateur. L'interface-opérateur s'occupe aussi de capter et traduire les commandes de l'opérateur destinées à l'interface-opérateur et au robot. Ce processus bidirectionnel temps réel d'échange d'informations comporte des limitations relatives à la puissance du système

ordonné, aux logiciels utilisés et aux capacités du canal de communication. Cette section présente l'architecture du logiciel, l'interface-opérateur conçue avec ses mécanismes de commande et ses modalités de visualisation.

4.2.1 Architecture logicielle

La figure 4.2 présente un schéma global de l'architecture logicielle conçue permettant de réaliser différentes configurations d'interfaces-opérateurs pour téléopérer un robot réel ou en simulation. L'élément central de cette architecture est un engin qui gère cycliquement l'ensemble des processus logiciels de l'application. Il est similaire à un engin de jeux vidéo où le rendu visuel est bâti à partir d'un modèle 3D de l'environnement et des objets auxquels des contraintes physiques sont appliquées. L'engin est relié à un module de communication temps réel par un gestionnaire de messages selon le protocole de communication développé [LABONTÉ 2006b]. Un module horloge basé sur une minuterie interne à l'ordinateur et à haute résolution sert de base à divers algorithmes pour le calcul de délais, des mécanismes de synchronisation des horloges de l'interface-opérateur et du robot ainsi que pour l'algorithme d'extrapolation de positionnement entre les messages de position du robot. L'architecture logicielle exploite divers fichiers : des modèles 3D de l'environnement et des objets préalablement numérisés, des fichiers de configurations, des fichiers d'images vidéo pour fin de simulation ou pour reconstruction de rendu visuel, des fichiers de logs qui sont utilisés pour la mesure de performances lors de téléopération, et des fichiers de simulation permettant de déplacer un robot virtuel dans le modèle 3D à partir de l'interface-opérateur. L'interface d'application (API) OpenGL™ a été utilisée pour la gestion et la génération des éléments modélisés en 3D. Les images vidéo envoyées par le robot sont intégrées au rendu visuel des modèles virtuels 3D. Tout le code de l'interface a été réalisé en C++.

Les interactions de l'opérateur influencent la position et le comportement du point d'observation et des objets dans l'environnement. Le processus de génération de l'affichage est répété le plus rapidement possible pour réaliser un rendu naturel. Dans notre cas, les commandes de l'opérateur sont envoyées en temps réel au robot qui, de son côté, renvoie les informations de localisation, de vitesse et de ses senseurs vers l'interface-opérateur, permettant ainsi d'ajuster le modèle à la réalité distante.

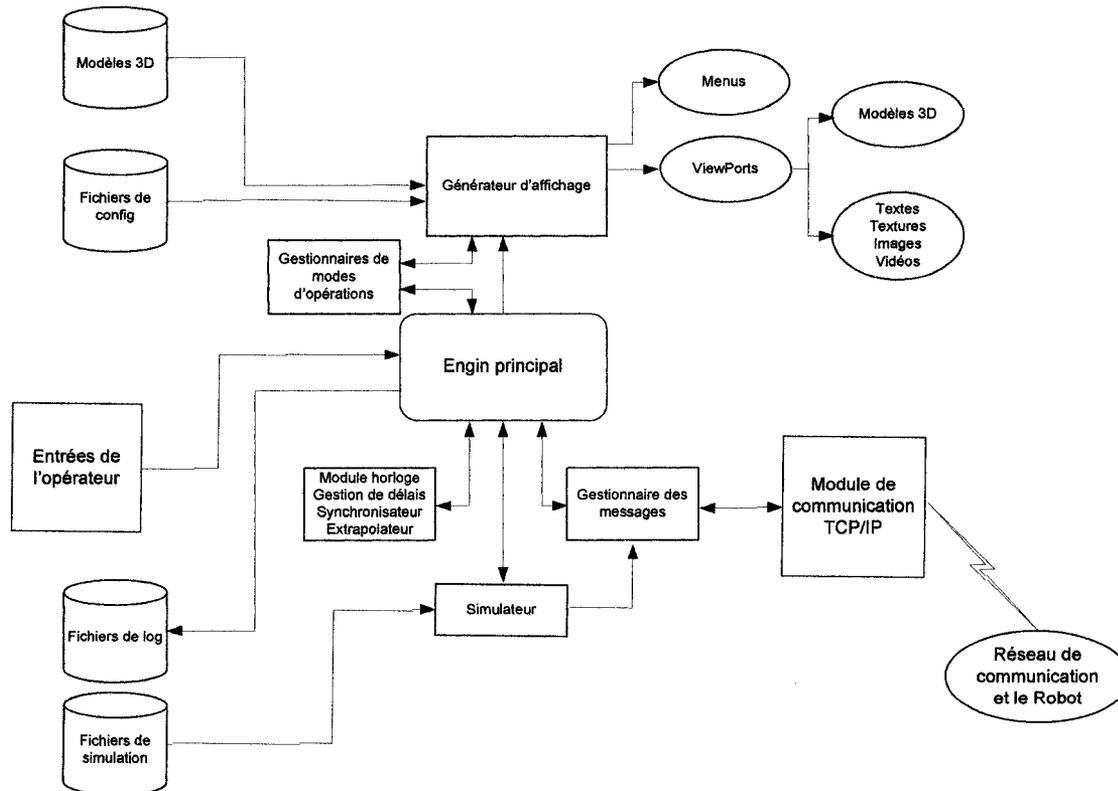


Figure 4.2 Architecture logicielle de l'interface-opérateur de téléopération

L'interface-opérateur de téléopération est équipée d'éléments spécifiques à un outil d'évaluation géré par le module de gestion des modes et celui de gestion des messages. Le premier est un mécanisme d'enregistrement des commandes et des messages de l'interface-opérateur et du robot, de façon à pouvoir extraire et calculer les informations de performance reliées à diverses métriques d'évaluation lors de téléopérations réelles. Le second élément est un module de simulation qui a permis le développement évolutif de l'interface-opérateur en parallèle avec celui du robot, la mise au point et la vérification du protocole de communication, et la réalisation de divers tests unitaires et système. Une zone d'affichage est prévue pour la présentation en temps réel des valeurs de variables internes au logiciel. Enfin, il est possible d'activer sélectivement les différentes zones et modalités de visualisation de l'interface-opérateur. Cette interface-opérateur est par conséquent reconfigurable selon les vues qui sont activées, ce qui permet d'évaluer comparativement les performances de chaque configuration dans des conditions similaires. Ce mécanisme a

comme but de faciliter les expérimentations et n'est donc pas considéré comme une fonctionnalité accessible à l'opérateur dans des tâches de téléopération.

4.2.2 Composantes de l'interface-opérateur de téléopération

L'interface-opérateur montrée à la figure 4.3 intègre les fonctionnalités requises pour la téléopération du robot. L'annexe B présente en détails ces fonctionnalités et nous ne reprenons ici que les principaux points. Les zones visuelles de l'interface-opérateur sont au nombre de six.



Figure 4.3 Interface-opérateur de téléopération

- A) Barre de menus de type Windows dans la partie supérieure.
- B) Vue centrale présentant les images vidéo de la caméra et la vue du modèle.
- C) Carte des lieux en vue aérienne dans le coin supérieur gauche.
- D) Le robot et ses senseurs en-dessous de la carte.
- E) Zone d'informations textuelles pour le dépannage, coin à gauche et en bas de la zone robot.
- F) Le tableau de bord dans le bas et à droite de la zone d'information et en dessous de la zone principale de visualisation de la caméra vidéo avant et du modèle 3D.

4.2.3 Mécanismes de commandes

La considération des facteurs humains et d'ergonomie lors de la conception d'interface-opérateur de téléopération recommande l'utilisation de métaphores et de

mécanismes d'interaction appropriés aux utilisateurs et à l'application. C'est ce qui s'appelle le modèle conceptuel et se définit comme étant :

« ... a set of integrated ideas and concepts about what it should do, behave and look like, that will be understandable by users in the manner intended » [PREECE 2002]

Une métaphore bien référencée permet d'utiliser des capacités et des habiletés déjà acquises par une personne afin de les solliciter implicitement lors de l'usage d'une interface-opérateur. Ce choix permet de réduire d'une part les efforts d'apprentissage requis, et d'autre part les efforts cognitifs de l'opérateur lors de son usage tel que noté par le groupe de Goodrich [GOODRICH 2005] avec leur approche de conception écologique. Par exemple, le domaine des jeux vidéo utilise abondamment celle du tableau de bord de véhicule avec un volant de conduite. Le volant, l'accélérateur, le frein et l'indicateur de vitesse sont des éléments très familiers pour la majorité des personnes. Plusieurs mécanismes ont été prévus pour permettre une adaptation selon les tâches à réaliser pour l'application.

Pour répondre aux diverses recommandations énoncées au chapitre 2, nous avons intégré différentes améliorations en rapport aux mécanismes de commande du robot via l'interface-opérateur. Quatre modes de commandes sont implémentés : le joystick virtuel, le volant, les points de chutes et le mode autonome. Une bande verticale de boutons (située à gauche du joystick volant) permet de sélectionner ces modes.



Figure 4.4 Mode joystick virtuel JSV en direction avant à vitesse maximum

- a) **Joystick virtuel (JSV).** Le tableau de bord de ce mécanisme est illustré à la figure 4.4. Le joystick est utilisé dans la plupart des interfaces-opérateurs répertoriées. Le mécanisme de joystick implanté ici fonctionne à partir d'une

image virtuelle du bâton de commande (rond noir) placé au centre d'un cercle de contrôle. Ce rond noir peut être déplacé avec le bouton de la souris qui est raccordée à l'ordinateur. L'opérateur doit sélectionner le rond noir et le déplacer dans le cercle. Le robot se déplace dans la direction du rond et proportionnellement à la position dans le cercle. Plus la position du rond est vers l'avant, plus la vitesse linéaire du robot est proche de sa valeur limite fixée à 25 cm/sec. Ceci correspond à une vitesse équivalente à celle d'un déplacement normal d'une personne dans un domicile. La vitesse de rotation du robot est, quant à elle, fixée selon la position gauche-droite du rond, avec comme valeur limite 28 degrés/sec. L'indicateur de vitesse à gauche indique la vitesse réelle retournée par les senseurs du robot. L'anneau du volant (cercle gris) suit les mouvements de rotation du joystick. Pour une opération sécuritaire de la téléopération du robot, dès que le rond est relâché, l'interface-opérateur annule les valeurs de vitesse et envoie une commande d'arrêt du robot. Enfin, les environnements domiciliaires peuvent comporter des situations où il est requis que le robot déplace de petits objets qui obstruent son passage. Pour ces situations, un mode particulier de commande a été implanté pour pousser des objets avec la partie avant du robot. De façon à fournir un mécanisme sécuritaire, la fonction de poussée est temporaire et se désactive automatiquement dès que l'opérateur relâche le rond du joystick. Le mode n'est accessible qu'avec le joystick.



Figure 4.5 Mode volant virtuel VV en direction avant selon position de la barre de vitesse et volant de rotation.

- b) **Volant virtuel (VV).** Dans ce mode, l'opérateur ajuste la vitesse linéaire désirée pour contrôler le déplacement du robot de gauche à droite avec le bouton du volant et le pointeur de la souris. La figure 4.5 illustre le tableau de bord de ce

mode. Un anneau supplémentaire entourant celui du joystick a été conçu pour représenter le mécanisme de volant. Une indication visuelle de la vitesse est ajoutée dans l'indicateur de vitesse, en affichant une barre positionnée à la vitesse choisie. Ce n'est qu'au moment où le volant est sélectionné que le robot bouge à la vitesse prescrite. L'opérateur peut en tout temps modifier cette vitesse avec l'aide de la roue de la souris, sans relâcher le volant. Ce mécanisme permet de fixer une vitesse sécuritaire pour le contournement d'obstacles ou le passage de portes. Il décharge ainsi l'opérateur d'une composante de contrôle (la vitesse du robot) afin de se concentrer uniquement sur la direction fine et précise du robot.

- c) **Points de chute.** Ce mode permet de réaliser un trajet complexe et ininterrompu de déplacements du robot par points de chute. Une mémoire tampon de quatre points de chute est intégrée à l'interface-opérateur. Ces points peuvent être introduits sur la carte, dans le modèle 3D ou sous la ligne d'horizon dans la vue vidéo de l'interface-opérateur, par simple clic de la souris dans la zone correspondante. Toutes ces possibilités produisent des points valables et cohérents en un trajet reliant directement ces points. Lors de l'atteinte du point par le robot, l'interface-opérateur retire la représentation du point sur l'image et communique alors le suivant (s'il en reste un), et ceci tant qu'il y en a. La figure 4.6 illustre la présence de deux points, le premier en rouge et le second en bleu. L'opérateur peut éditer à volonté tous les points qui ne sont pas encore envoyés au robot, et ceci sans solliciter de messages ou de directives au robot; tout se fait dans le modèle 3D de l'interface-opérateur. L'interface-opérateur représente les points sur toutes les vues actives de l'interface-opérateur : la carte standard, le modèle, dans la vue vidéo et dans le modèle 3D. Ce mode de déplacement ne s'active que si l'opérateur demande spécifiquement d'aller au premier point de chute spécifié dans l'interface-opérateur, en cliquant sur le bouton GO (triangle vert).



Figure 4.6 Navigation par points de chute dans la zone centrale de la modalité RA

- d) **Mode de commandes directes.** Ce mode consiste à permettre au robot de se déplacer de façon autonome ou semi-autonome, comme par exemple pour un retour au point de charge. Ce mode est décrit dans [CLOUTIER 2007] et n'est pas utile pour les tests de téléopération.

L'interface-opérateur est configurée pour que le robot se comporte avec le joystick et le volant comme un véhicule automobile en se dirigeant dans le sens demandé. La combinaison de commandes de translation et de rotation produit un effet de rotation différent si le robot avance ou s'il recule, comme avec un véhicule réel. Le joystick et le volant sont intimement intégrés et le passage d'un mode à l'autre est optimal par leur proximité. Cette conception est optimisée en rapport à la contrainte de la loi de Fitt qui détermine le temps d'exécution de commandes en fonction du la grosseur des boutons cibles et des distances de déplacement du curseur de la souris pour les réaliser [RASKIN 2000].

4.2.4 Modalités de visualisation

Trois modalités de visualisation sont disponibles avec notre interface-opérateur : une interface de type Vidéo Centrique multifenêtres conventionnelle VC2D (figure 4.7), une interface VC en réalité augmentée RA3D (figure 4.8), et une interface CC en réalité et perspective mixte exocentrique ME3D (figure 4.9). Un protocole de communication a été développé pour permettre la transmission continue de la position du robot et ainsi

permettre le positionnement exact de la vue virtuelle dans l'interface-opérateur. Un mécanisme d'extrapolation est aussi utilisé pour positionner adéquatement le modèle entre chaque cycle de rafraîchissement de l'écran. Ces informations permettent de faire correspondre précisément les éléments du modèle avec ceux de la vue vidéo de la scène devant le robot.

La figure 4.7 présente plus spécifiquement l'interface-opérateur avec la modalité VC2D, comportant dans sa zone centrale le flux vidéo provenant de la caméra de navigation montée sur le Télérobot.



Figure 4.7 Interface-opérateur de téléopération conventionnelle VC2D

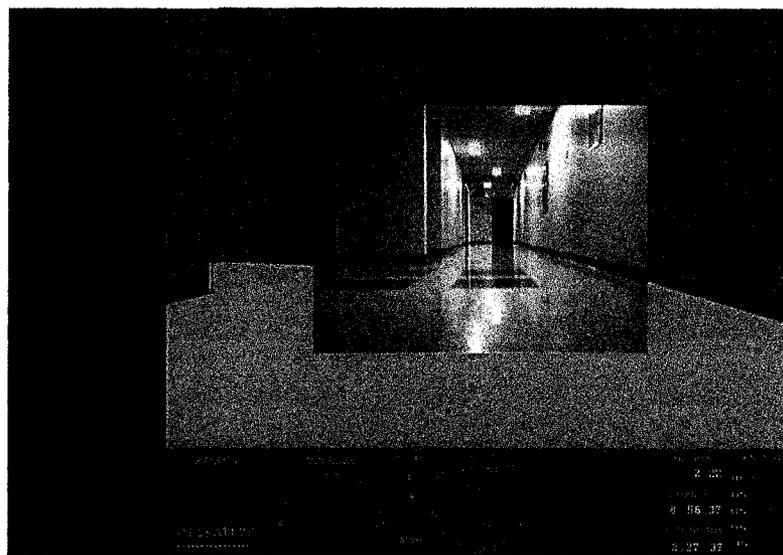


Figure 4.8 Interfaces-opérateurs améliorées RA3D

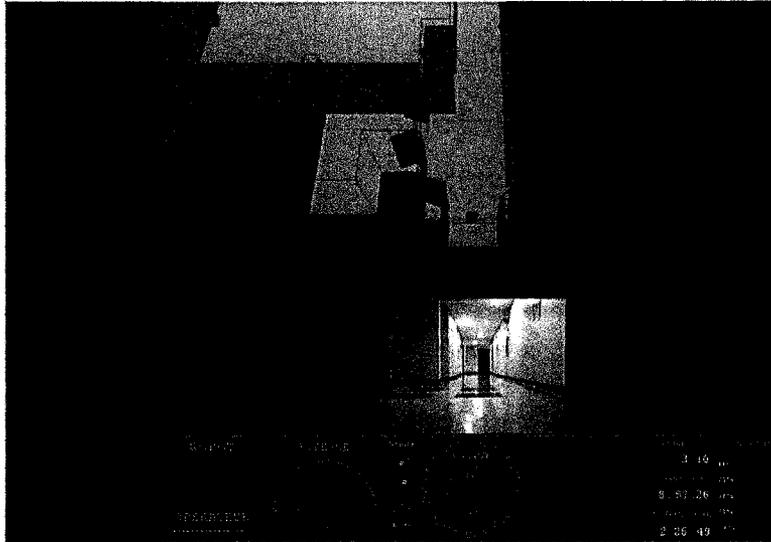


Figure 4.9 Interfaces-opérateurs améliorées ME3D

La figure 4.8 illustre l'interface-opérateur Vidéo Centrique en Réalité Augmentée RA3D. Cette interface-opérateur comporte un élargissement de l'angle de vue de la scène par l'ajout d'un modèle 3D en réalité virtuelle de l'environnement. Ce mode est intégré dynamiquement à la vue vidéo de la scène. L'angle de vue horizontal de la caméra standard est de 43 degrés et l'angle de vue vertical est de 32,3 degrés. Avec le modèle 3D, les angles de vue horizontal et vertical sont alors plus grands (respectivement 80 degrés et 64 degrés), procurant ainsi à l'opérateur plus d'informations et, par conséquent, facilite la construction de son modèle mental de l'environnement distant. La superposition des images vidéo sur le modèle 3D est faite avec l'application d'un facteur de transparence de 80%, ceci pour réaliser une certaine fusion des deux vues.

Enfin, la figure 4.9 illustre l'interface-opérateur ME3D. Cette interface-opérateur comporte une vue principale exocentrique d'un modèle 3D de l'environnement et une vue secondaire égocentrique des images vidéo de la caméra du robot. Il en résulte un mode de visualisation en position aérienne permettant de voir le robot évoluer dans la carte 3D de l'environnement. La vue vidéo est légèrement réduite par rapport à l'interface-opérateur RA3D, et est présentée près du tableau de bord et en bas de la vue du robot dans la carte. Cette position est différente de celles utilisées par les chercheurs qui ont utilisé la modalité

ME2½D [RICKS 2004, BRUEMMER 2005, DRURY 2007] rapportés au chapitre 3. Dans leur cas, elles étaient positionnées en face du robot dans la carte (et de façon plus réduite) ou au dessus de la carte. Nous avons choisi une position basse pour ne pas entrer en conflit avec la présence d'une vue de rétroviseur dans la partie haute de la zone de visualisation. Cette vue égocentrique donne une possibilité de percevoir l'environnement comme si l'opérateur était assis sur le robot, référençant ainsi la position du robot avec la vue vidéo. En effet, la vue vidéo est présentée simultanément à la vue aérienne du modèle où le robot est fixe, maintenant en permanence la vue de l'opérateur dans l'axe du robot. Dans cette vue, le robot est donc toujours représenté de bas en haut et au centre de la vue, et le modèle 3D pivote et se déplace relativement au robot. Ce mode de visualisation où les deux types de positionnement de point de vue sont présentés et stabilisés en fonction de la localisation et de l'angle du robot crée une relation simple et efficace pouvant réduire la charge cognitive de l'opérateur. Ce mécanisme crée une référence (*ground*) entre les deux réalités (réelle et virtuelle) et les deux perspectives (exocentrique et égocentrique).

4.3 Tests de fonctionnalités et de performances du système robotique téléopéré

Des tests de fonctionnalité de l'interface-opérateur ont été réalisés avec deux robots. Le premier est un robot Pioneer 2DX et le second est le robot spécialement développé pour les domiciles, le Télérobot. Le robot Pioneer avait des problèmes de performances internes et pour la transmission vidéo sur le réseau sans fil ce qui n'a pas permis la poursuite des tests de performances avec ce robot. Les différents modes de visualisation et de contrôle ont été validés lors de tests de téléopération en laboratoire avec le Télérobot. L'annexe B présente les détails de l'ensemble de ces tests et les résultats obtenus.

Une fois les tests de fonctionnalité réussis, les tests de performance du système ont été réalisés avec la plateforme robotique Télérobot. Ces tests sont regroupés en trois catégories : les tests de communication, les modalités de visualisation de l'interface-opérateur et les tests de positionnement du robot. Le tableau 4.1 regroupe les résultats obtenus lors de cette série de tests de performances décrits plus en détails à l'annexe C.

TABLEAU 4.1 PERFORMANCES DU SYSTÈME DE TÉLÉOPÉRATION

	Performances maximum	Conditions
Communication		
Taux de transfert des images vidéo	33 images/sec	Images couleur de 320 x 240 pixels
Cycle de rafraîchissement de l'interface-opérateur	20 msec	Valeur maximum
Variation de temps avec le message de positionnement	89 msec	16 msec d'écart-type
Délai de retour de commande JSV et VV	400 msec	
Visualisation		
Délai de rafraîchissement VC	8,8 msec	
Délai de rafraîchissement RA	10,5 msec	Sans la vue de la carte
Délai de rafraîchissement ME	9,7 msec	
Délai de rafraîchissement RA	11,5 msec	Avec vue de la carte et du robot
Résolution de correspondance de la vue vidéo avec modèle RA	0,3 degré vertical	Objet à 15 mètres
Positionnement		
Erreur d'extrapolation de positionnement lors de rotation	9,1 %	
Erreur d'extrapolation de positionnement lors d'accélération en rotation	14,4%	
Distance d'arrêt après commande STOP	9,7 cm	Vitesse maximum de 30 cm/sec
Distance d'arrêt après commande STOP	5 cm	Vitesse de 15 cm/sec
Angle d'arrêt après commande STOP	21 degrés	Vitesse de rotation maximale de 28 degrés/sec
Angle d'arrêt après commande STOP	10,5 degrés	Vitesse de rotation maximale de 14 degrés/sec
Vitesse de rotation lors de translation-rotations simultanées	10 degrés/sec	Translation de 30 cm/sec et rotation de 28 degrés/sec
Bruit d'angle maximum dans parcours	± 0,2 degré (écart-type 0,4 degré)	
Bruit de positionnement dans parcours	2,1 cm (écart-type 1,8 cm)	
Erreur de position angulaire dans parcours	± 1,3 degré (écart-type 1,1 degré)	
Erreur de positionnement dans parcours	5,7 cm (écart-type 2,8 cm)	

Les caractéristiques de la section Communication du tableau 4.1 montrent un taux de transfert vidéo amplement suffisant pour assurer la qualité du rendu de la scène malgré les mouvements du robot. Pour ce qui est du délai de retour de commande, la valeur obtenue indique qu'il y a un certain effet perturbant occasionné à l'opérateur à cause du fait que la valeur du délai est supérieure à 200 msec [RASKIN 2004, SHEIK 2005]. Cette situation risque d'avoir un impact sur les performances absolues des opérateurs, en particulier sur des opérateurs novices. Les résultats relatifs selon différentes modalités par contre seraient affectés de la même façon car le délai s'applique quelque soit la modalité utilisée. Point de vue Visualisation, les performances du système en termes de délais de rafraîchissements sont très bonnes et ne perturbent pas les perceptions de l'opérateur. Pour ce qui est du positionnement, les erreurs d'extrapolation sont acceptables et ne causent que des variations assez légères du positionnement du modèle. Les valeurs de distance d'arrêt et d'angles de rotation sont un peu fortes mais ne causent pas de problèmes importants. Par contre, les valeurs de bruit (plage de variations des données de positionnement lorsque le robot est à l'arrêt) et d'erreurs d'angle et de position dans le parcours sont suffisamment élevées pour occasionner des perturbations perceptibles par l'opérateur. Ces perturbations influencent la modalité RA3D, car ces données servent à positionner précisément le modèle par rapport aux éléments des images vidéo. Dans la vue ME3D, ces perturbations sont beaucoup moins perceptibles à cause de la distance du point de vue par rapport au modèle.

5 MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION

L'évaluation de l'avancement technologique du système en fonction de l'amélioration des performances de téléopération est faite grâce à des expériences avec un opérateur expérimenté et un groupe d'opérateurs novices sur des parcours de tests réels. Ce chapitre présente la méthodologie expérimentale utilisée pour réaliser les tests de références et les tests comparatifs des opérateurs selon les trois modalités de visualisation de l'interface-opérateur. Le postulat de travail posé ici est que les expérimentations réalisées se font dans des conditions qui comportent des défis similaires à un environnement domiciliaire.

5.1 Conditions expérimentales

Cinq critères ont été posés pour une téléopération sécuritaire et efficace visant le déplacement et le positionnement d'un robot mobile distant dans une application de télésurveillance. Ces critères sont présentés par ordre de priorité pour la réalisation des tâches demandées par l'application.

1. Ne pas occasionner d'incidents (aux personnes, à l'environnement ou au robot).
2. Minimiser la distance parcourue lors de déplacement et de positionnement du robot.
3. Utiliser le moins de commandes possibles.
4. Utiliser des modes de commande appropriée.
5. Réaliser les missions en un minimum de temps possible.

Le critère 2 est relié à la précision des trajets réalisés par le robot entre les obstacles des parcours. Les opérateurs doivent diriger précisément le robot entre les obstacles pour avoir un trajet minimum. Le nombre de commandes (critère 3) est relié à la charge cognitive des opérateurs. Le critère 5 est étroitement lié à la valeur de la vitesse moyenne du robot que les opérateurs utilisent lors des essais.

Les critères 1 et 4 n'ont pas été considérés lors de nos tests. La mesure du nombre d'incidents ne s'avère pas pertinente car l'environnement et les mécanismes de contrôle

(e.g., mécanisme d'arrêt devant un obstacle implanté dans le robot) utilisés permettent d'éviter les incidents perturbants. De plus, aucun test ne fut fait en présence de personnes, et cet aspect sera réalisé dans des travaux subséquents dans des domiciles. De même, le choix des modes de commandes a été volontairement restreint à celui du joystick virtuel (JSV) afin d'évaluer spécifiquement l'impact des modalités de visualisation avec un seul mécanisme de commande qui sollicite une attention continue de l'opérateur, afin ainsi de répondre spécifiquement à la question de recherche identifiée.

Plusieurs actions ont été prises pour éliminer des biais relatifs aux caractéristiques de l'interface-opérateur et du système lors des expérimentations.

- Toutes les fenêtres (vues) sont de positions et de dimensions fixes.
- Le tableau de bord est toujours présenté de façon identique.
- Les différentes vues peuvent être allumées ou éteintes selon les expériences, mais ne peuvent être redimensionnées ou déplacées.
- La vue vidéo est de résolution constante. Sa position et sa dimension sont les mêmes pour les deux premiers modes de visualisation (VC2D et RA3D). Le troisième mode (ME3D) utilise une vue légèrement plus petite et déplacée vers le bas de la fenêtre pour faire place au modèle 3D.
- Tous les planchers, murs, portes ainsi que le mobilier sont modélisés. Selon le parcours, divers objets (obstacles) sont présents.

5.1.1 Parcours

Deux parcours différents ont été élaborés pour les tests des interfaces-opérateurs : le parcours de la cuisine et le parcours du corridor. Les consignes d'opération découlant des critères retenus et données aux opérateurs sont, par ordre de priorité :

1. Déplacer et positionner le robot entre les obstacles pour prendre une photographie des affiches.
2. Utiliser le moins de commandes possibles.
3. Réaliser rapidement le parcours sans faire de pause, sauf entre les missions ou

entre les étapes, entre les essais ou après les prises de photographies.

Les parcours comportent chacune trois tâches :

- Cuisine

- Tâche A (figure 5.1) : déplacer le robot de sa position de départ vers l’affiche 1, pousser la porte d’armoire qui est ouverte, aller se positionner devant l’affiche pour voir correctement les chiffres inscrits et prendre une photographie (un bouton est prévu à cet effet sur le tableau de bord permettant au système de capter le moment où cette action est faite). À noter que pour cette tâche, la porte d’armoire est ouverte à 90 degrés de façon à obstruer le passage du robot, obligeant ainsi l’opérateur à utiliser le mode de pousser pour cette tâche. La figure 5.2 présente des photos du robot à trois endroits de ce parcours : au début, en face de la porte d’armoire et lors de la prise de la photo de l’affiche 1.
- Tâche B (figure 5.3) : déplacer le robot vers l’affiche 2, aller se positionner devant l’affiche pour voir correctement les chiffres inscrits et prendre une photographie. La figure 5.4 présente des photos du robot dans six endroits du parcours, du début du trajet devant l’affiche 1 jusqu’à l’affiche 2.
- Tâche C (figure 5.5) : retourner le robot à son point de départ. Notez que la porte d’armoire est alors refermée lors du retour du robot à son point de départ. La figure 5.6 présente des photos du robot, de l’affiche 2 jusqu’à son point de départ de la mission.

- Corridor

- Tâche D (figure 5.7) : déplacer le robot de sa position de départ vers le corridor, se déplacer en slalom entre les trois boîtes du corridor vers l’affiche 3, se positionner pour voir correctement les chiffres inscrits et prendre une photographie. Pour ce parcours, le robot part de la même position que les parcours dans la cuisine. La figures 5.8 présente des photos du robot du début du trajet jusqu’au positionnement du robot devant l’affiche 3.

- Tâche E (figure 5.9) : revenir sur ses pas en refaisant le slalom entre les boîtes jusqu'à la boîte 3. La figure 5.10 présente des photos du robot devant l'affiche 3 après la prise de photographie jusqu'à la première boîte du corridor.
- Tâche F (figure 5.11) : passer le cadre de porte et revenir au point de départ. La figure 5.12 présente des photos du robot à côté de la boîte 3, au travers du passage de porte et vers le point de retour dans la cuisine.

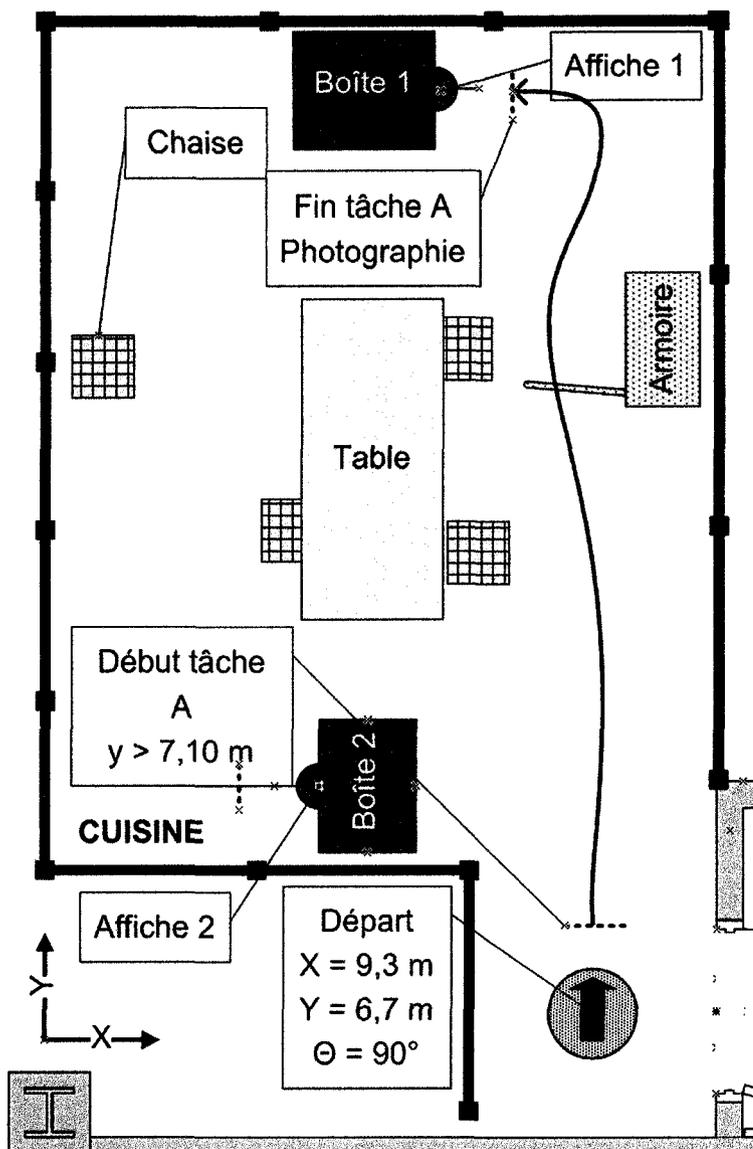


Figure 5.1 Trajet de la tâche A

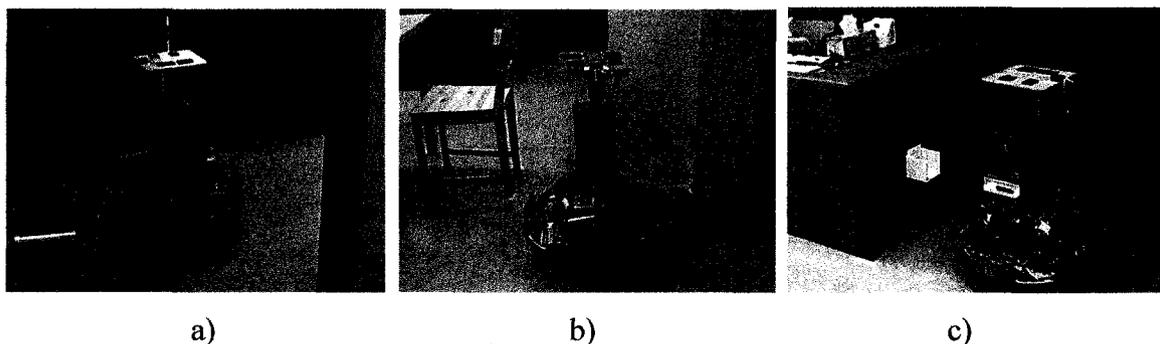


Figure 5.2 Illustration des étapes de la tâche A : a) début du parcours, b) devant porte de l'armoire et c) photographie de l'affiche 1

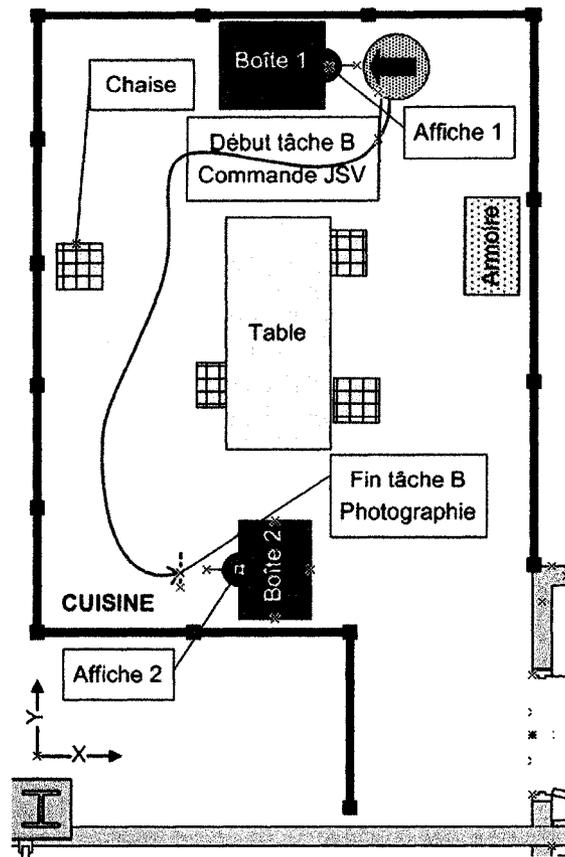


Figure 5.3 Trajet de la tâche B

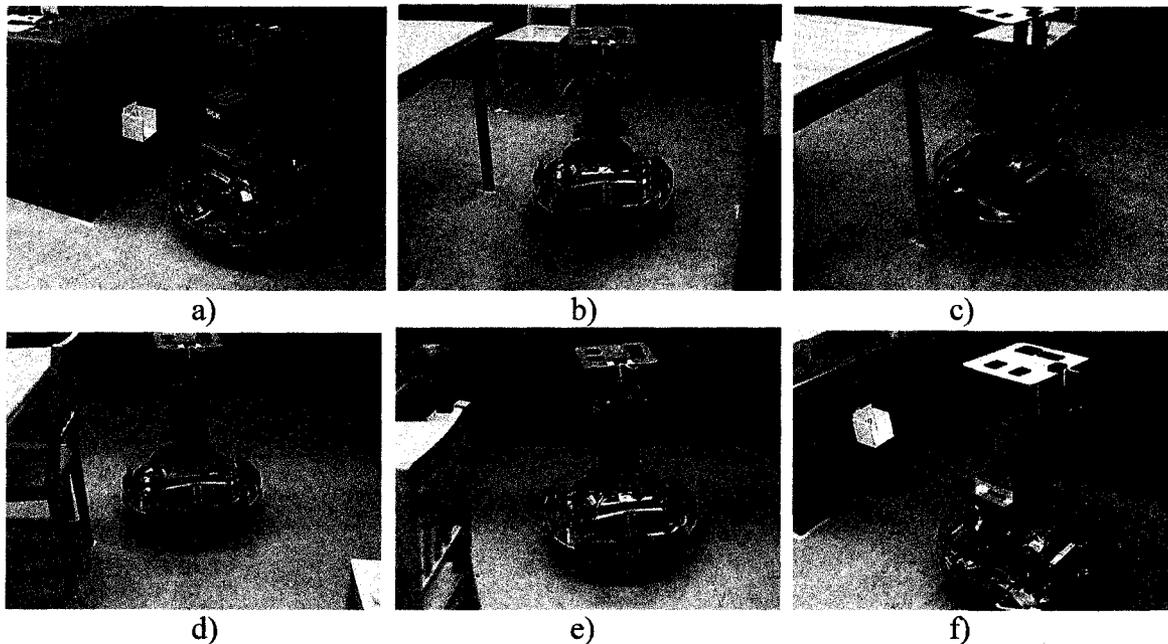


Figure 5.4 Illustration des étapes de la tâche B : a) départ, b) entre la boîte et la table, c) entre la table et la chaise, d) après la table et la chaise, e) près de la boîte 2 et f) photographie de l'affiche 2

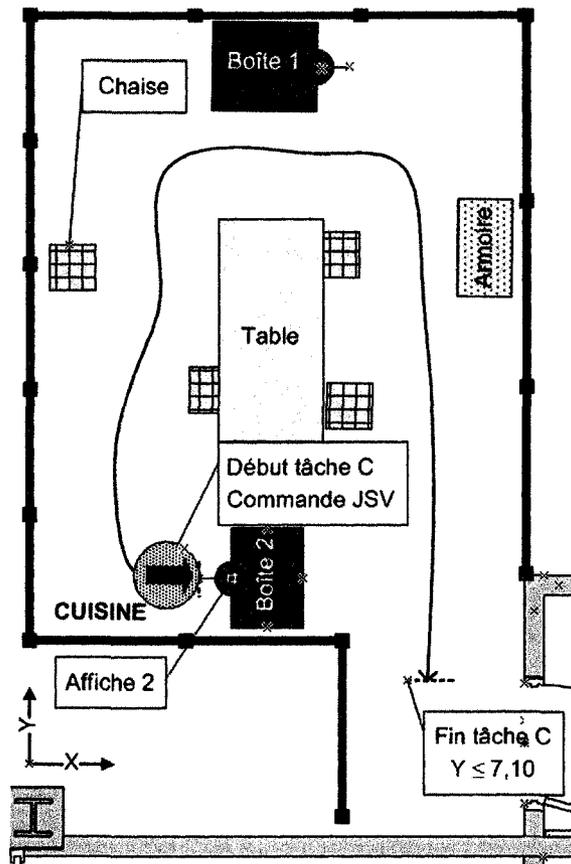


Figure 5.5 Trajet de la tâche C

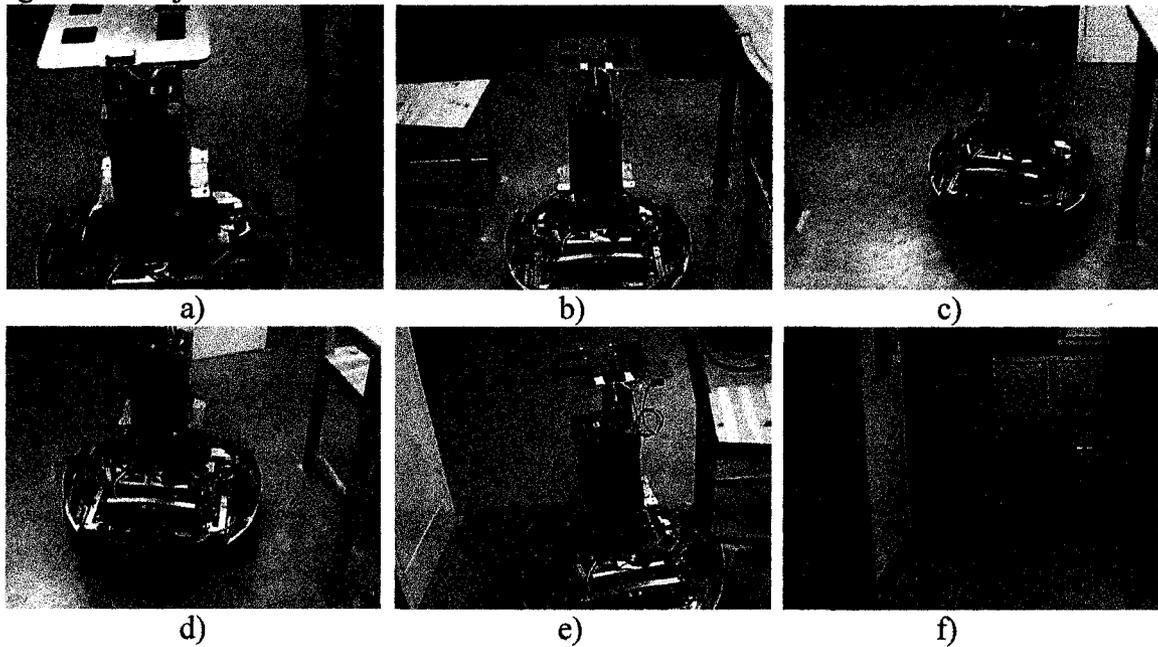


Figure 5.6 Illustration des étapes de la tâche C : a) départ, b) entre la chaise et la table, c) entre la boîte 1 et la table, d) vers l'armoire, e) entre l'armoire et la chaise et f) fin du parcours

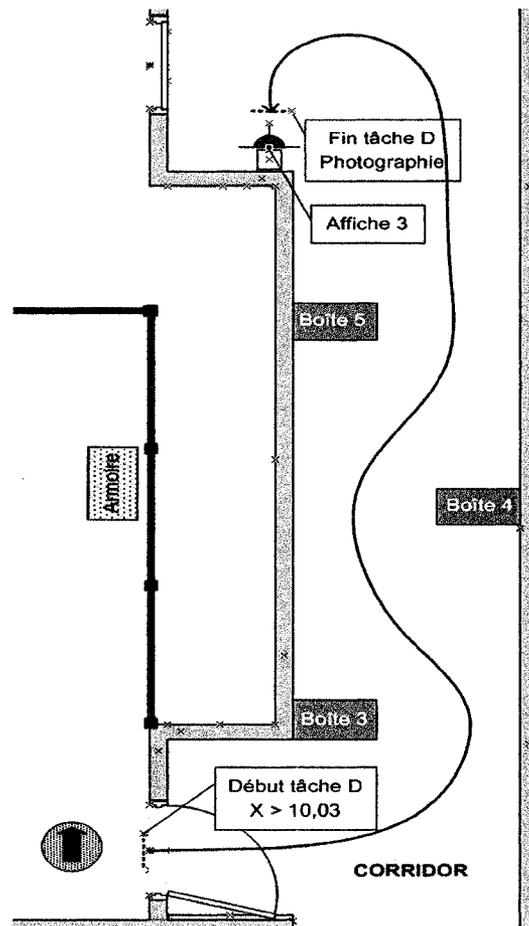


Figure 5.7 Trajet de la tâche D

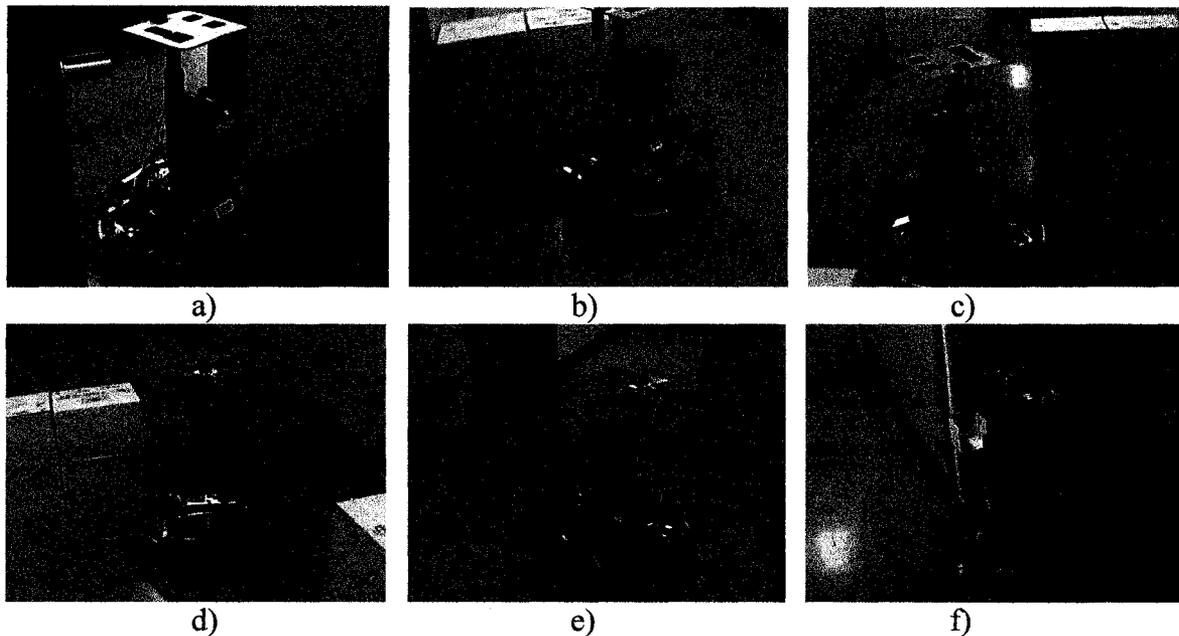


Figure 5.8 Illustration des étapes de la tâche D : a) début du parcours, b) début slalom, boîte 3, c) dans le slalom, d) fin du slalom, e) vers l'affiche 3 et f) photographie de l'affiche 3

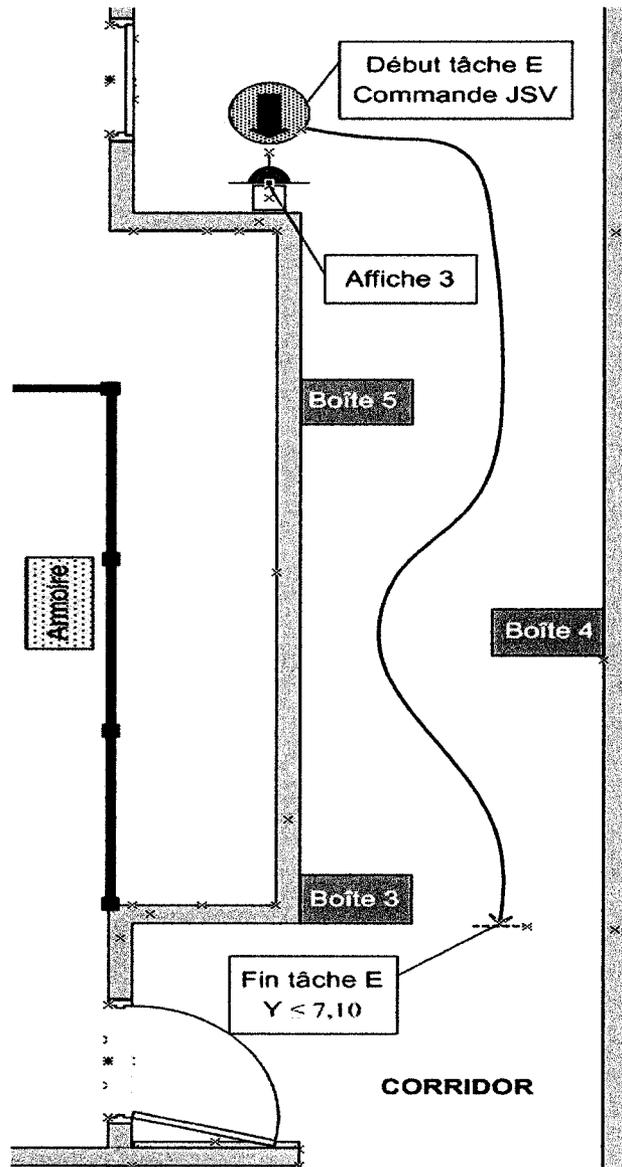


Figure 5.9 Trajet de la tâche E

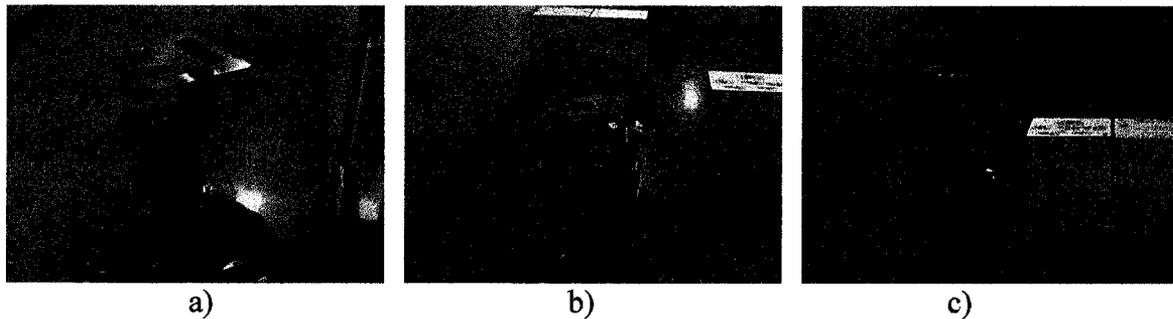


Figure 5.10 Illustration des étapes de la tâche E : a) départ, b) refait le slalom et c) fin du slalom, boîte 3

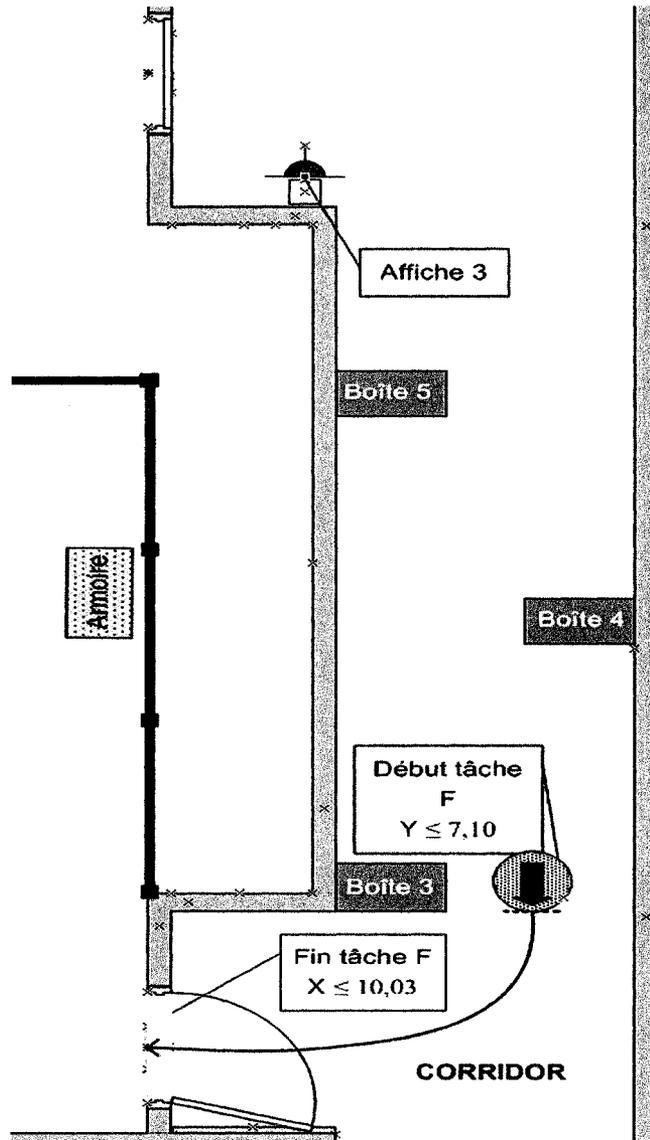


Figure 5.11 Trajet de la tâche F

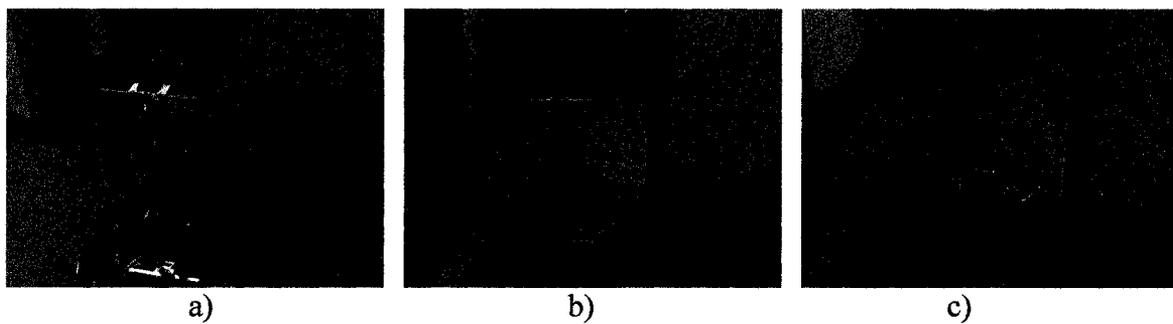


Figure 5.12 Illustration des étapes de la tâche F : a) départ, b) passage de porte et c) fin du parcours

Les tâches sont exécutées de façon séquentielle et continue pour chaque parcours. L'ordre de présentation des modalités de visualisation sur les parcours est alterné selon une séquence de carré latin afin de s'assurer de ne pas avoir d'effet d'ordre dans les résultats observés chez les opérateurs. L'annexe D présente la liste des séquences utilisées pour chaque opérateur. Le tableau 5.1 résume chaque tâche et les critères de début et de fin pour le calcul des performances selon les métriques retenues. Les coordonnées du point de départ du robot pour les parcours sont $X = 9,3$ m et $Y = 6,7$ m, $\theta = 90$ degrés.

TABLEAU 5.1 SEGMENTATION DES TÂCHES SUR LES PARCOURS

Tâche	Description	Critères de début et fin pour les métriques
A	<ul style="list-style-type: none"> • Point de départ dans la cuisine • Se déplacer vers la porte d'armoire • Pousser la porte • Se positionner devant l'affiche 1 • Prendre une photographie 	<ul style="list-style-type: none"> • Commence lorsque le robot passe le point $Y > 7,098$ m • Termine lorsque l'opérateur prend la photographie de l'affiche 1
B	<ul style="list-style-type: none"> • Départ de l'affiche 1 • Se déplacer vers l'affiche 2 • Se positionner devant l'affiche • Prendre une photographie 	<ul style="list-style-type: none"> • Commence lorsque l'opérateur sélectionne le joystick pour déplacer le robot • Termine lorsque l'opérateur prend la photographie de l'affiche 2
C	<ul style="list-style-type: none"> • Départ de l'affiche 2 • Faire le trajet inverse pour revenir au point de départ 	<ul style="list-style-type: none"> • Commence lorsque l'opérateur sélectionne le joystick pour déplacer le robot • Termine lorsque le robot passe le point $Y \leq 7,098$ m
D	<ul style="list-style-type: none"> • Point de départ de la cuisine • Rotation vers la porte du corridor • Aller dans le corridor vers la gauche • Contourner les boîtes • Se positionner devant l'affiche 3 • Prendre une photographie 	<ul style="list-style-type: none"> • Commence lorsque le robot dépasse le point $X > 10,032$ m • Termine lorsque l'opérateur prend la photographie de l'affiche 3
E	<ul style="list-style-type: none"> • Départ de l'affiche 3 • Se déplacer vers les boîtes pour faire le trajet inverse • Se déplacer entre les boîtes pour revenir avant la boîte 3 	<ul style="list-style-type: none"> • Commence lorsque l'opérateur sélectionne le joystick pour déplacer le robot • Termine lorsque le robot dépasse le point $Y \leq 7,098$ m
F	<ul style="list-style-type: none"> • Juste après la boîte 3 • Tourner vers l'entrée de la porte à droite • Entrer dans la cuisine jusqu'au point de départ 	<ul style="list-style-type: none"> • Commence lorsque le robot dépasse le point $Y \leq 7,098$ m • Termine lorsque le robot dépasse le point $X \leq 10,032$ m

5.1.2 Variables dépendantes et indépendantes

Les métriques quantitatives (ou les variables dépendantes) retenues pour ces tests dans les parcours sont :

- t , le temps d'exécution entre le moment du début et la fin de chaque tâche (tableau 5.1) ;
- d , la distance parcourue lors de la réalisation de chaque tâche ;
- nc , le nombre de commandes utilisées pour réaliser chaque tâche. Le nombre de commandes est défini comme étant une séquence d'utilisation sans relâche du rond noir de joystick. Lorsque l'opérateur relâche le bouton de souris qu'il utilise pour activer et contrôler le joystick, l'interface-opérateur envoie une commande d'arrêt au robot. Une nouvelle commande est alors comptabilisée chaque fois que l'opérateur réutilise le joystick.

Les essais réalisés sont faits selon les facteurs-clés (variables indépendantes) de modalités de visualisation (VC2D, RA3D, ME3D).

Trois séries d'essais avec des performances stables (CV inférieur ou égale à 5% entre les essais) pour chacune des trois modalités de visualisation et sur les deux parcours sont réalisés par l'opérateur expert. Le total des essais servant à établir les performances de références est donc de 18.

5.2 Tests pour établir les performances de référence

Ces expériences consistent à obtenir des performances de références pour chacune des tâches réalisées avec les trois modalités de visualisation. Ces résultats servent de valeurs de comparaison avec les résultats des opérateurs sollicités pour les tests de performances comparatives. Simultanément, ces expériences démontrent la capacité de téléopération du Télérobot par des opérateurs expérimentés pour l'exécution de tâches comportant des défis réels de téléopération (trajets, contournement d'obstacles, déplacement de petits objets, passages de corridors), similaires à ce qui se trouveraient dans de vrais domiciles.

Trois opérateurs expérimentés ont réalisé librement des essais avec chacune des modalités de visualisation (VC2D, RA3D, ME3D) et des mécanismes de commandes

disponibles (joystick virtuel, volant virtuel et points de chute). L'opérateur le plus performant (qualifié d'expert) fut retenu pour réaliser plusieurs essais consécutifs. Ces essais consistent à réaliser les tâches prévues dans les parcours de tests afin d'obtenir des performances quasi-optimales (i.e., des performances qui s'approchent des performances optimales théoriques, compte tenu des limitations physiques du robot et des conditions de l'environnementales) pour chacune des modalités de visualisation. Trois critères sont utilisés pour l'obtention de ces performances qui serviront de référence pour évaluer les performances des novices. Le premier consiste à minimiser le nombre de commandes utilisées par l'opérateur pour chacune des tâches. Le second consiste à utiliser les vitesses les plus rapides possibles pour l'exécution des différents déplacements du robot avec le joystick virtuel, le mécanisme de commande choisi pour les tests. Le troisième est la stabilité des performances observées. La stabilité est évaluée par le coefficient de variation (CV) en pourcentage pour chaque métrique m , telle qu'exprimé par l'équation 5-1.

$$CV(m) = \frac{Ecart-type(m)}{Moyenne(m)} * 100 \quad (5-1)$$

5.3 Tests comparatifs avec opérateurs novices

Ces tests sont réalisés avec un groupe d'opérateurs novices qui réalisent pour chaque modalités de visualisation et chacun à leur tour les deux parcours. Les opérateurs recrutés n'ont pas d'expérience de téléopération de robot mobiles. Ils ont été sélectionnés de façon à avoir une bonne répartition de l'âge, du sexe et de la profession des candidats. Le choix fut aussi fait parmi des candidats jouant peu à des jeux vidéo. Cette portion du projet impliquant des sujets humains qui ne faisaient pas partie de l'équipe de recherche, les participants ont eu à signer un formulaire de consentement (voir document en annexe G).

La procédure adoptée pour leur participation est la suivante. Une période de familiarisation est réalisée avec chaque opérateur avant les essais. Une présentation de l'interface-opérateur sur vidéo leur est faite, suivi par une présentation des parcours et de la présentation du robot. Immédiatement après, les opérateurs réalisent librement un essai dans un trajet de pratique à l'écart des parcours de tests, avec les trois modalités de visualisation de l'interface-opérateur. Les opérateurs réalisent ensuite les essais selon les six tâches. Finalement, les opérateurs répondent à un questionnaire portant sur l'utilisabilité

de l'interface-opérateur (voir l'annexe E).

Les conditions suivantes ont été suivies lors des expériences avec les opérateurs² :

- Tous les opérateurs ont répondu au questionnaire d'information.
- Tous les opérateurs ont une vision corrigée lorsque requis.
- Tous les opérateurs ont exécuté les manipulations avec leur main préférée (dominante).
- Tous les opérateurs sont familiers avec l'usage d'un ordinateur et d'une souris de pointage.

5.3.1 Taille d'échantillon

Les analyses statistiques de cette étude sont basées sur un estimé de taille d'échantillon de 34 opérateurs. Cet estimé de taille d'échantillon est calculé en fonction d'être en mesure de détecter avec une puissance de 80% et un alpha de 0,05 lors d'un test-t bilatéral des différences de performances dans les métriques choisies correspondant à une taille d'effet de 0,5. Considérant que le nombre de variation des séquences de tests est de 12 (c'est-à-dire trois modalités et deux parcours en alternances), ceci nous amène à choisir un nombre d'échantillon de convenance multiple de 12, soit 36 opérateurs.

5.3.2 Référencement des données

Pour les analyses, les résultats des essais pour les novices sont ensuite référencés par rapport aux performances de l'expert (voir section 5.2). Ceci permet de qualifier l'écart de performance pour chaque vue des novices par rapport aux performances quasi-optimales. Tel qu'exprimé par l'équation 5-2, QE (pour Quotient Expert) est le rapport référencé à l'opérateur expert des opérateurs novices pour une métrique m . Ce rapport s'obtient en divisant la performance moyenne d'un opérateur novice (PN) selon une modalité de visualisation x par la moyenne des performances utilisées par l'opérateur expert pour les trois modalités de visualisation pour cette même métrique (PE_{VC} pour la vue Vidéo Centrique, PE_{RA} pour la vue Réalité Augmentée et PE_{ME} pour la vue Mixte Exocentrique).

$$QE_x(m) = \frac{PN_x(m)}{(PE_{VC}(m)+PE_{RA}(m)+PE_{ME}(m))/3} \quad (5-2)$$

² Ces critères ont été ajustés en fonction de ceux utilisés et décrits dans l'article d'Oliveras et al. [OLIVERAS 2003].

De façon à évaluer de manière quantitative l'effet d'entraînement des opérateurs novices lors de la réalisation des essais, trois opérateurs novices ont été retenus pour répéter, dans un délai de 3 à 4 semaines, les premiers essais qu'ils ont faits. Les résultats de ces performances avant (T_0) et après (T_1) le délai sont comparés et exprimés en termes de taux d'amélioration des performances (TA en %) pour chaque métrique (m), telle qu'exprimé par l'équation 5-3.

$$TA_x(m) = \frac{(QE_x^{T_0}(m) - QE_x^{T_1}(m))}{QE_x^{T_0}(m)} * 100 \quad (5-3)$$

Enfin, un autre facteur quantitatif est évalué afin de démontrer les différences significatives de performance entre les modalités de visualisation. Ce facteur consiste à auto-référencer les performances de chaque opérateur novice pour une modalité par rapport à leurs performances moyennes pour les trois modalités. Cette procédure d'auto-référencement est requise étant donné que la variation en valeur absolue des performances d'un sujet à l'autre est trop grande. L'auto-référencement permet d'obtenir une courbe de distribution normale des valeurs de performance. L'équation 5-4 exprime le rapport auto-référencé QA (pour Quotient Auto-référencé) pour une modalité x . Ce rapport s'obtient en divisant la performance d'un opérateur novice (PN) par la moyenne des performances pour les trois modalités qu'il a obtenue (PN_{VC} pour la vue vidéo centrique, PN_{RA} pour la vue réalité augmentée et PN_{ME} pour la vue mixte exo) pour une métrique m .

$$QA_x(m) = \frac{PN_x(m)}{(PN_{VC} + PN_{RA} + PN_{ME})/3} \quad (5-4)$$

6 RÉSULTATS

Ce chapitre présente les résultats issus de l'application de la méthodologie expérimentale présentée au chapitre 5. Les analyses des métriques utilisées lors de ces expériences se font en deux étapes. La première consiste à présenter, à l'aide de statistiques descriptives, les performances de l'expert, suivi des caractéristiques des opérateurs novices et de leurs performances référencées à l'expert (*QE*) et auto-référencées (*QA*), pour chacune des métriques. Ensuite, le taux et les caractéristiques de l'apprentissage de trois opérateurs choisis dans le groupe de novices sont présentés. Enfin, les résultats du questionnaire d'utilisabilité sont aussi présentés.

La deuxième étape de l'analyse consiste à appliquer des méthodes statistiques inférentielles afin d'étudier l'impact des modalités de visualisation sur les performances des participants. Des analyses de variance avec mesures répétées sont faites sur les données auto-référencées des performances des novices, pour chacune des métriques et des tâches. Pour les tâches ayant un rejet de l'hypothèse d'égalité des moyennes (seuil de signification, $\alpha \leq 5\%$), les résultats d'analyse de contraste (i.e., par comparaison de moyennes qui permettant d'identifier parmi une série de mesures, e.g., 1 vs 2, 1 vs 3, 2 vs 3, celles qui sont différentes entre elles) sont présentés afin de faire ressortir les cas démontrant la supériorité d'une modalité par rapport aux autres. Des analyses de variance multi-facteurs sont ensuite effectuées sur les données des novices pour déterminer si certaines des caractéristiques de ces opérateurs ont une influence sur les résultats obtenus. Quatre caractéristiques sont examinées : le sexe, l'âge, le nombre d'heures de travail sur ordinateur et le nombre d'heures de jeux vidéo par semaine. Enfin, les résultats des questionnaires d'utilisabilité sur la facilité et la performance des modalités de visualisation font l'objet d'une analyse de variance pour ensuite être comparés par une analyse de corrélation avec les performances réelles que les novices ont obtenues.

6.1 Tests de performance de téléopération par l'expert

Les performances de l'expert sont quasi-optimales quand le nombre de commandes utilisées pour les réaliser est minimal et que les métriques de *t* et *d* sont stables avec un coefficient de variation inférieur ou égal à 5%. La réalisation des tâches avec le nombre

minimum de commandes tout en utilisant la plus grande vitesse du robot correspond à l'atteinte des performances optimales et nécessite une expérience suffisante de la part de l'opérateur. Un minimum de dix essais (12, 10 et 11) a été requis pour chacune des modalités de visualisation pour que l'expert réussisse à obtenir ces résultats. Les résultats sont dérivés des trois derniers essais réalisés par l'expert dans ces conditions.

Le tableau 6.1 présente les mesures de la métrique t . Les tâches sont positionnées dans le tableau selon trois groupes : déplacement et positionnement devant une affiche (tâches A, B et D); déplacement entre des objets (tâches C et E); passage de porte (tâche F). Les coefficients de variation (CV) totaux sur tous les essais pour chaque modalité ne dépassent pas la valeur de 5%. La tâche F est celle qui comporte le plus de fluctuations du CV sur l'ensemble des modalités de visualisation. La modalité VC2D produit les meilleures performances, suivie par la RA3D et enfin la ME3D. L'écart de performance entre la VC2D et la ME3D n'est par contre que de 2%.

TABLEAU 6.1 VARIATION DES PERFORMANCES DE L'EXPERT, MÉTRIQUE t (EN SEC)

	Tâche	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moyenne	Écart-type	CV
VC2D	A	30,9	29,1	29,2	29,8	1,0	3%
	B	32,0	32,0	26,7	30,3	3,1	10%
	D	54,4	50,0	53,3	52,6	2,3	4%
	C	42,4	43,9	40,1	42,1	1,9	5%
	E	36,0	35,8	36,9	36,2	0,6	2%
	F	10,6	14,1	13,7	12,8	1,9	15%
	Total	206,4	205,0	200,0	203,8	10,8	5%
RA3D	A	30,3	28,8	30,3	29,8	0,8	3%
	B	34,3	33,4	29,5	32,4	2,5	8%
	D	51,3	56,3	51,3	53,0	2,9	5%
	C	42,1	42,4	42,6	42,4	0,2	1%
	E	38,0	36,0	35,5	36,5	1,3	4%
	F	11,6	10,7	11,7	11,3	0,5	5%
	Total	207,6	207,7	200,8	205,4	8,3	4%
ME3D	A	30,6	28,8	28,9	29,4	1,0	4%
	B	35,3	32,9	35,3	34,5	1,4	4%
	D	50,9	52,3	53,5	52,3	1,3	2%
	C	44,4	46,3	39,6	43,5	3,5	8%
	E	38,9	36,5	39,2	38,2	1,4	4%
	F	11,3	9,3	9,9	10,2	1,0	10%
	Total	211,4	206,1	206,5	208,0	9,7	5%

Le tableau 6.2 présente les mesures de la métrique d sur trois essais. Les CV totaux selon des essais pour chaque modalité ne dépassent pas la valeur de 5%. Pour cette métrique, c'est encore la tâche F qui se démarque par un taux de variation CV élevé. La modalité VC2D produit les meilleures performances, suivie par la RA3D et enfin la ME3D. L'écart de performance entre la VC2D et la ME3D est de 9,8%.

TABLEAU 6.2 VARIATION DES PERFORMANCES DE L'EXPERT, MÉTRIQUE d (EN CM)

	Tâche	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moyenne	Écart-type	CV
VC2D	A	51,8	52,2	50,8	51,6	0,6	1%
	B	55,6	57,2	53,6	55,5	1,5	3%
	D	127,6	117,4	128,8	124,6	5,1	4%
	C	55,6	57,2	53,6	55,5	1,5	3%
	E	81,8	81,1	84,0	82,3	1,2	2%
	F	24,6	29,6	27,4	27,2	2,0	8%
	Total	397,0	394,7	398,2	396,6	11,9	3%
RA3D	A	51,3	52,1	52,4	51,9	0,6	1%
	B	57,3	59,2	58,0	58,2	1,0	2%
	D	117,4	123,2	117,0	119,2	3,5	3%
	C	89,6	91,2	92,6	91,1	1,5	2%
	E	81,7	85,0	82,7	83,1	1,7	2%
	F	23,6	22,9	27,0	24,5	2,2	9%
	Total	420,9	433,6	429,7	428,1	10,4	2%
ME3D	A	52,3	51,4	52,2	52,0	0,5	1%
	B	61,2	61,0	64,4	62,2	1,9	3%
	D	121,4	122,4	129,1	124,3	4,2	3%
	C	92,7	92,2	89,5	91,5	1,7	2%
	E	86,9	84,1	84,5	85,2	1,5	2%
	F	27,2	23,1	23,7	24,7	2,2	9%
	Total	441,7	434,2	443,4	439,8	12,0	3%

Le tableau 6.3 présente les mesures de la métrique nc . Les CV totaux des essais pour chaque modalité ne dépassent pas la valeur de 5%. Il faut noter que pour cette métrique, l'expert a réalisé toutes les tâches et essais en utilisant le nombre de commandes minimum sauf dans une seule tâche où une seule commande supplémentaire a été utilisée. Cette situation n'a pas été notée lors des essais et a été observée lors de l'analyse finale des données. Aucune différence entre les performances n'est observée entre les modalités.

TABLEAU 6.3 VARIATION DES PERFORMANCES DE L'EXPERT, MÉTRIQUE *nc*

	Tâche	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Moyenne
VC2D	A	4	4	4	4
	B	1	1	1	1
	D	3	3	3	3
	C	1	1	1	1
	E	1	1	1	1
	F	1	1	1	1
	Total	11	11	11	11
RA3D	A	4	4	4	4
	B	1	1	1	1
	D	3	4	3	3
	C	1	1	1	1
	E	1	1	1	1
	F	1	1	1	1
	Total	11	12	11	11
ME3D	A	4	4	4	4
	B	1	1	1	1
	D	3	3	3	3
	C	1	1	1	1
	E	1	1	1	1
	F	1	1	1	1
	Total	11	11	11	11

Le tableau 6.4 regroupe les mesures des métriques en fonction des parcours. La principale différence observée entre les deux parcours est que la modalité VC2D est plus performante de 4,9% en terme de temps par rapport à la ME3D, qui s'avère être la moins performante dans le parcours de la cuisine. Par contre, dans le parcours du corridor, c'est la modalité ME3D qui est la plus performante, mais seulement que de 1% par rapport à la modalité VC2D. Ces résultats s'expliquent par le fait que le parcours de la cuisine est plus compact et un mode egocentrique serait plus utile à l'opérateur pour cette situation. Le parcours du corridor comprend des tâches de déplacements plus linéaires, ce qui favorise de meilleures performances avec une vue globale exocentrique comme la ME3D.

Enfin, la vitesse linéaire de translation maximum permise du robot durant les essais est de 25 cm/sec. Les valeurs de vitesses moyennes observées pour le parcours dans la cuisine est de 19 cm/sec, et pour le parcours du corridor elle est de 23 cm/sec. Ceci

confirme la quasi-optimalité des performances observées avec l'expert. En étant proche de la vitesse optimale, cette situation signifie aussi que l'opérateur a très bien composé avec la charge cognitive imposée pour les tâches.

TABLEAU 6.4 PERFORMANCES MOYENNES DE L'EXPERT POUR LES TROIS MÉTRIQUES EN FONCTION DES PARCOURS

Test	<i>t</i> (sec)	<i>d</i> (cm)	<i>nc</i> (commandes)
Cuisine avec VC2D	102,17	19,64	6,0
Cuisine avec RA3D	104,57	20,12	6,0
Cuisine avec ME3D	107,41	20,56	6,0
Corridor avec VC2D	101,62	23,41	5,0
Corridor avec RA3D	100,79	22,68	5,3
Corridor avec ME3D	100,61	23,41	5,0

6.2 Caractéristiques du groupe d'opérateurs novices

Tel qu'expliqué à la section 5.3.1, nous avons identifié un groupe minimal requis de 36 opérateurs. Toutefois, le groupe sollicité fut de 39 opérateurs novices. Les résultats pour deux opérateurs n'ont pu être utilisés. Dans un cas, le fichier de log n'avait pas été activé correctement, et dans l'autre le système est tombé en panne de façon irrémédiable en cours d'expérimentation. Ceci qui porta à 37 ceux qui ont adéquatement réalisé les essais. Le tableau 6.5 présente les caractéristiques du groupe résultant de 37 opérateurs, qui se compose de 20 femmes et de 17 hommes.

TABLEAU 6.5 CARACTÉRISTIQUES DES 37 OPÉRATEURS NOVICES

Caractéristiques	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
Âge	34,3	13,3	19	61
Années de scolarité	16,1	2,5	13	22
Heures de travail avec ordinateur/semaine	23,7	15,1	1	60
Heures de jeu vidéo/semaine	3,1	6,9	0	30
Heures de conduite/semaine	5,5	5,6	0	25

Notons qu'il y a dans l'échantillon retenu 2,3 fois plus d'hommes qui jouent à des jeux vidéo que de femmes. En rapport aux âges, dans le groupe de jeunes de 19 à 39 ans, il

y en a 1,75 fois plus qui jouent que dans le groupe des plus âgés. La répartition des professions montrée au tableau 6.6 se fait sur huit catégories. La catégorie Étudiant comporte plus de sujets que prévu à cause de la difficulté à trouver des sujets vers la fin des tests et pour remplacer les deux opérateurs qui n'ont pas été retenus.

TABLEAU 6.6 PROFESSION DES OPÉRATEURS NOVICES

Professions	Nombre
Professeur	5
Chercheur	2
Personnel administratif	7
Technicien	3
Programmeur/analyste	1
Étudiant	14
Professionnel en santé	2
Journalier et représentant	3

Lors de la réalisation et en fonction des opérateurs ayant produit des résultats, la variation de la séquence prévue de (3×12) n'est pas parfaite et comporte de légères variations qui sont montrées à l'annexe E. Ceci est dû au nombre d'opérateurs qui dépasse le nombre de possibilités de séquences répétées trois fois pour avoir un échantillon statistique probant, et à cause du retrait a posteriori de deux opérateurs du groupe d'opérateurs retenus.

6.3 Performances du groupe de novices référencées à celles de l'expert

Le tableau 6.7 présente le calcul des performances référencées QE évaluées selon l'équation 5-2 en fonction des trois modalités et selon les trois métriques utilisées. La figure 6.1 représente graphiquement ces résultats. Les performances de l'expert correspondent à la ligne d'axe unitaire. Selon les métriques, les performances du groupe de novices se positionnent de façon très distincte. Pour la métrique de distance d elles sont très près de celles de l'expert (1,11 à 1,16 fois). Ceci est dû au fait que les parcours sont très bien délimités et que les dérives en terme de distance sont dues essentiellement aux écarts occasionnés par l'imprécision du passage entre des obstacles. Celles du temps t sont plus hautes (2,14 à 2,30 fois) car les opérateurs novices n'ont pas les réflexes assez exercés pour

atteindre les performances de l'expert et réduisent donc la vitesse de déplacement entre les obstacles. Enfin, celles du nombre de commandes sont les plus éloignées (4,47 à 5,72 fois) des performances de l'expert. Ceci suggère que ce paramètre est le plus affecté par l'inexpérience des opérateurs et indique que la charge cognitive sollicitée dans les essais est très importante. Cette surcharge explique la diminution de la vitesse de déplacement du robot par les opérateurs novices par rapport à l'expert.

TABLEAU 6.7 PERFORMANCES RÉFÉRENCÉES *QE* SELON LES MODALITÉS ET LES MÉTRIQUES

Métrique	VC2D		RA3D		ME3D	
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
<i>t</i> (sec)	2,28	0,34	2,30	0,43	2,14	0,39
<i>d</i> (cm)	1,14	0,33	1,11	0,43	1,16	0,39
<i>nc</i> (commandes)	5,50	0,25	5,72	0,47	4,47	0,34

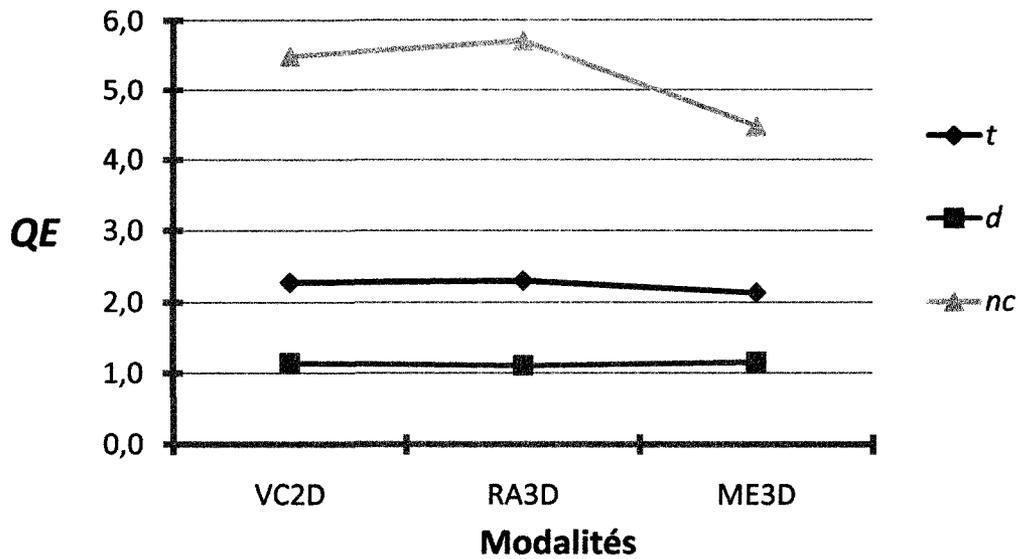


Figure 6.1 QE pour chaque modalité selon les métriques

Pour mieux comprendre ce qui se passe entre les modalités de visualisation, il faut examiner les performances au niveau des tâches. La figure 6.2 présente la répartition des performances QE en fonction des tâches pour la métrique t .

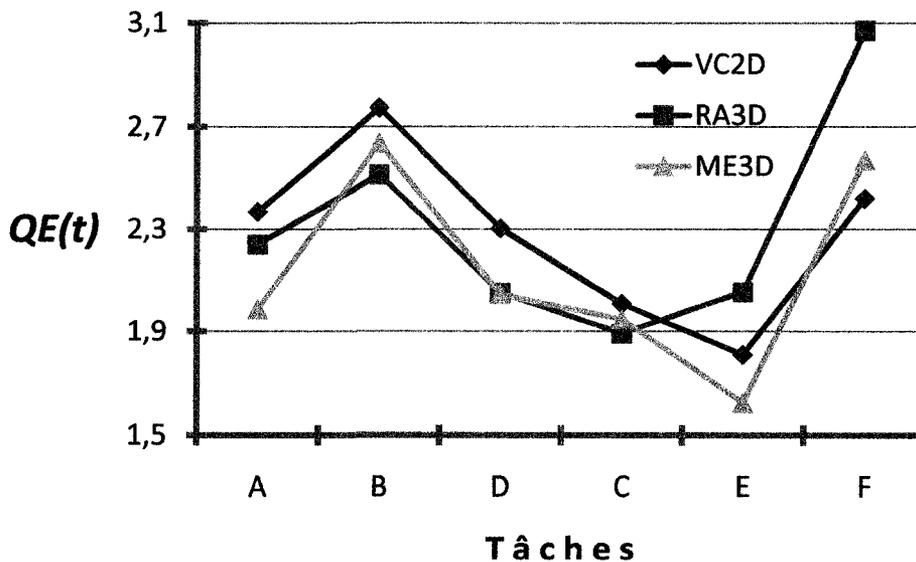


Figure 6.2 $QE(t)$ en fonction des six tâches

La répartition des tâches sur l'axe des ordonnées est faite en fonction des trois catégories de tâches, soit : A-B-D, C-E et F. L'examen des courbes montre que la courbe la plus basse, c'est-à-dire celle qui s'approche de la performance de l'expert, est la ME3D. Un

seul point de la courbe ME3D (soit pour la tâche F) est légèrement au-dessus de la courbe de la modalité VC2D.

Afin de déterminer la difficulté relative des tâches entre elles, on additionne les résultats des trois modalités pour chacune des tâches. Ceci permet d'avoir une appréciation globale de l'écart de performance par rapport à l'expert et indique l'ampleur de la difficulté d'exécution de la tâche par les novices. Il en résulte que la F est la tâche la plus complexe (avec 8,1), suivi de B (avec 7,9), A (avec 6,4), D (avec 6,4), C (avec 5,8) et E (avec 5,5). La tâche F comprend une seule rotation de 90 degrés mais aussi un passage dans le cadre de porte. La tâche B comporte quatre rotations de 90 degrés du robot, dont trois faites sur une courte distance et entre des objets de part et d'autre du robot.

La figure 6.3 illustre le même type de courbes mais pour la métrique d . La courbe la plus basse est celle de la modalité RA3D. Pour cette métrique de distance, ce sont aussi les tâches B (avec 3,6) et F (avec 3,5) qui sont les plus élevées, suivies des tâches A (avec 3,4) et les D, C et E (avec 3,3).

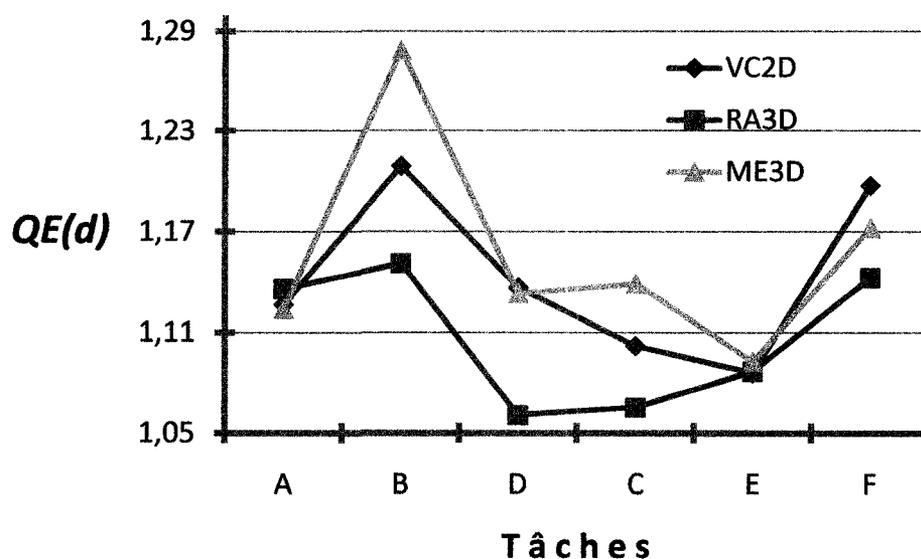


Figure 6.3 $QE(d)$ en fonction des tâches

Pour la métrique nc , c'est la courbe de la modalité ME3D qui s'avère être la plus basse. Pour cette métrique, les deux tâches ayant les moins bonnes performances sont les B (avec 26,9) et C (avec 21,2), suivies des tâches E (avec 15,1), F (avec 13), D (avec 11,7), A

(avec 6,1). La tâche C est similaire à la tâche B et comporte de nombreuses rotations du robot sur un parcours comportant de nombreux obstacles.

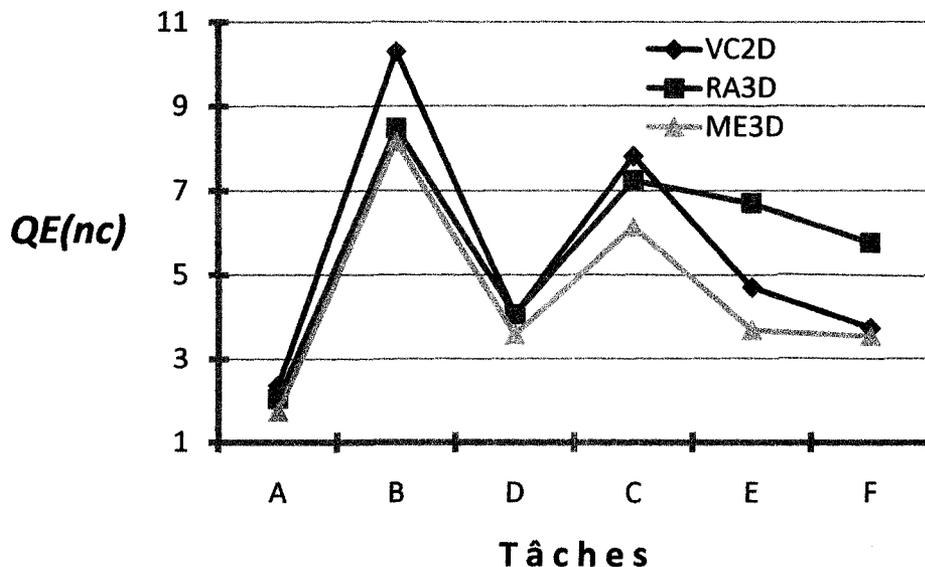


Figure 6.4 $QE(nc)$ en fonction des tâches

En résumé, les meilleures performances sont observées avec la modalité ME3D pour les métriques t et nc . Pour la métrique d , c'est la modalité RA3D qui affiche les meilleures performances, suivie de la ME3D. La modalité VC2D n'est jamais la meilleure des trois, quelle que soit la métrique. Ces tendances diffèrent de celles observées avec l'expert (voir section 6.1) et précise l'impact des modalités de visualisation en fonction des tâches réalisées par les novices. En faisant la somme des valeurs de performances obtenues pour chaque tâche (trois modalités et trois métriques), les difficultés relatives d'exécution des tâches par les novices sont dans un ordre décroissant de difficulté de 38,4 pour B, 30,3 pour C, 24,6 pour F, 23,9 pour E, 21,4 pour D à 15,9 pour A.

6.3.1 Évaluation de l'apprentissage des novices

Les figures 6.5 à 6.7 présentent, pour trois opérateurs novices (opérateurs 1, 6 et 36), les valeurs moyennes des trois métriques pour chaque modalité, initialement (T_0) et après 3 à 4 semaines (T_1) lors d'une 2^{ème} série de tests. Les courbes de performance pour T_1 sont plus basses et plus régulières que celles à T_0 . Les tableaux 6.8 à 6.10 présentent les valeurs de performances moyennes pour chaque opérateur en fonction des tâches. Les

performances à T_0 et T_1 y sont comparées de façon à évaluer l'amélioration en % de chaque opérateur. En faisant la moyenne des trois métriques, il est noté que l'opérateur 1 a amélioré ses performances pour les trois métriques de 41%, l'opérateur 6 de 40% et l'opérateur 36 de 38%, ce qui donne une amélioration globale moyenne de 40% avec un écart-type de 1%. Ceci confirme qu'il y a une amélioration appréciable des performances sous ces deux aspects et ceci pour les trois opérateurs.

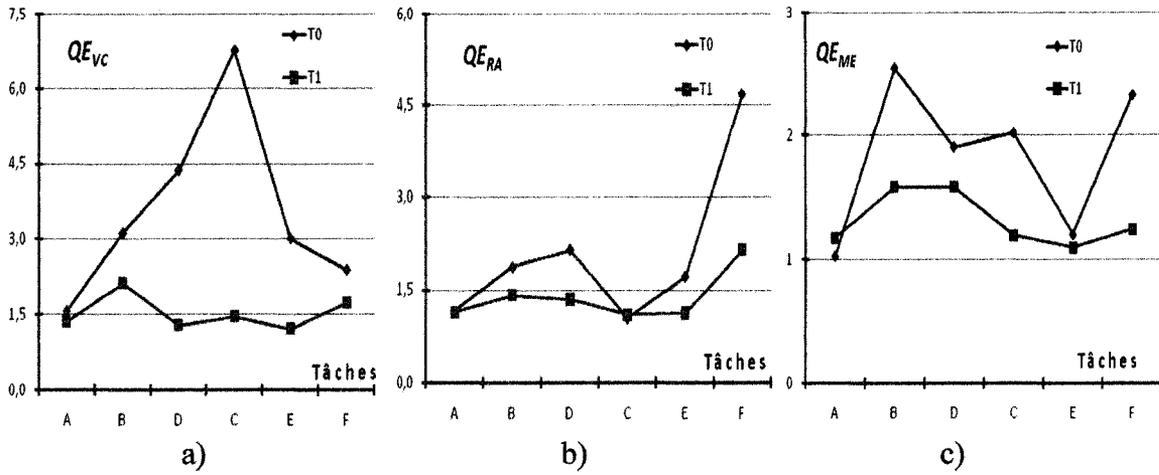


Figure 6.5 Apprentissage de l'opérateur 1 : a) VC2D, b) RA3D et c) ME3D

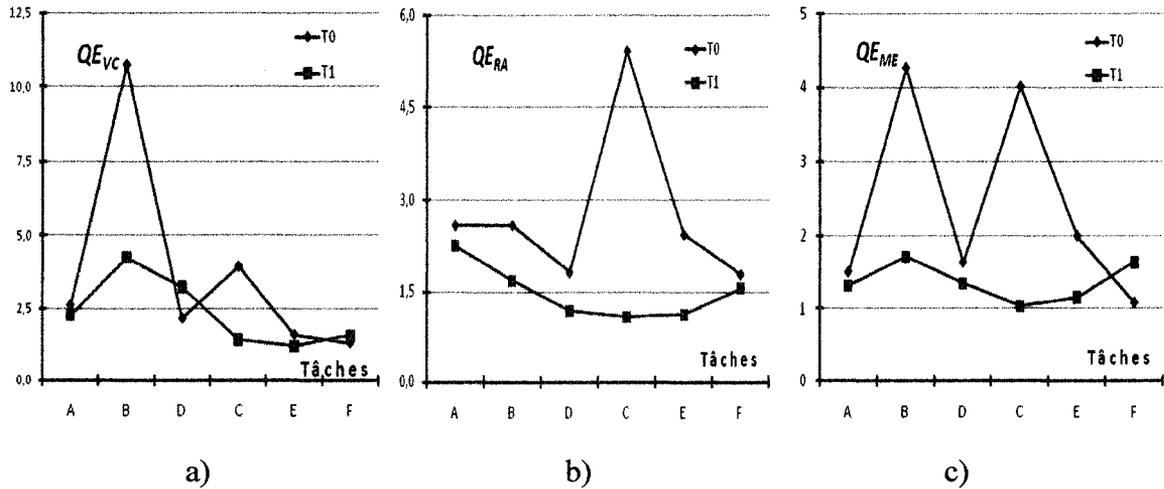


Figure 6.6 Apprentissage de l'opérateur 6 : a) VC2D, b) RA3D et c) ME3D

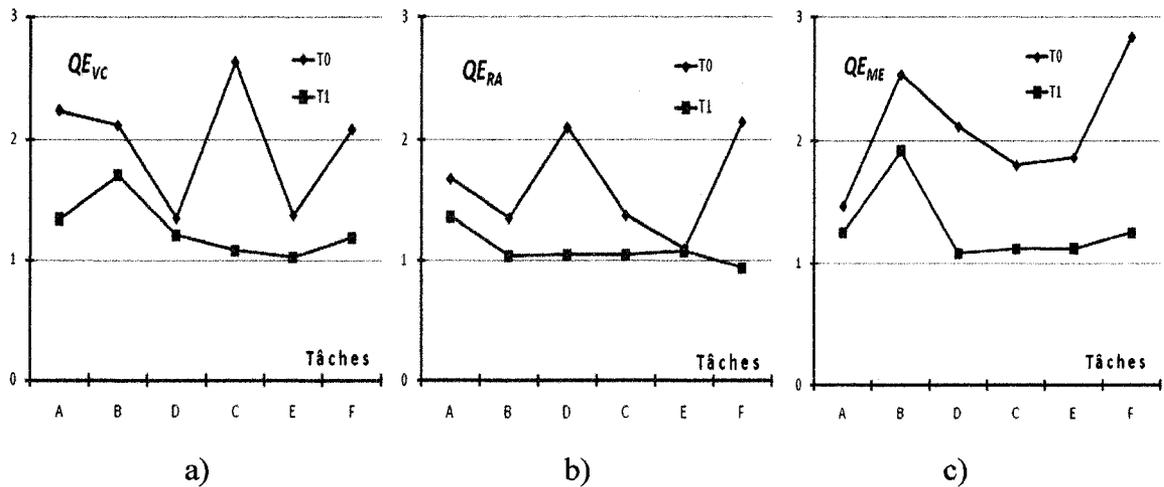


Figure 6.7 Apprentissage de l'opérateur 36 : a) VC2D, b) RA3D et c) ME3D

TABLEAU 6.8 RÉSULTATS D'APPRENTISSAGE DE TROIS OPÉRATEURS NOVICES SELON LA MÉTRIQUE t

Tâche	Opérateur 1		Opérateur 6		Opérateur 36	
	$QE^{T0}(t)$	$QE^{T1}(t)$	$QE^{T0}(t)$	$QE^{T1}(t)$	$QE^{T0}(t)$	$QE^{T1}(t)$
A	3,7	3,7	6,7	5,8	5,4	4,0
B	7,5	5,1	17,6	7,6	6,0	4,7
D	8,4	4,2	5,6	5,7	5,6	3,3
C	9,8	3,7	13,3	3,5	5,8	3,3
E	5,9	3,4	6,0	3,5	4,3	3,2
F	9,4	5,1	4,2	4,7	7,1	3,4
Total	44,8	25,3	53,3	30,9	34,3	21,9
TA(t)	44%		42%		36%	

TABLEAU 6.9 RÉSULTATS D'APPRENTISSAGE DE TROIS OPÉRATEURS NOVICES SELON LA MÉTRIQUE d

Tâche	Opérateur 1		Opérateur 6		Opérateur 36	
	$QE^{T0}(d)$	$QE^{T1}(d)$	$QE^{T0}(d)$	$QE^{T1}(d)$	$QE^{T0}(d)$	$QE^{T1}(d)$
A	6,7	5,8	10,8	9,4	8,2	7,1
B	17,6	7,6	24,4	11,0	21,8	9,3
D	5,6	5,7	9,0	8,3	7,2	7,1
C	13,3	3,5	22,7	5,6	17,3	4,6
E	6,0	3,5	10,4	5,7	8,0	4,6
F	4,2	4,7	7,0	7,9	5,2	6,4
Total	53,3	30,9	84,4	48,0	67,8	39,1
TA(d)	42%		43%		42%	

TABLEAU 6.10 RÉSULTATS D'APPRENTISSAGE DE TROIS OPÉRATEURS NOVICES SELON LA MÉTRIQUE nc

Tâche	Opérateur 1		Opérateur 6		Opérateur 36	
	$QE^{T0}(nc)$	$QE^{T1}(nc)$	$QE^{T0}(nc)$	$QE^{T1}(nc)$	$QE^{T0}(t)$	$QE^{T1}(nc)$
A	5,4	4,0	8,6	6,6	6,9	5,2
B	6,0	4,7	9,9	7,6	8,6	6,6
D	5,6	3,3	9,8	5,5	7,7	4,4
C	5,8	3,3	9,0	5,4	7,6	4,4
E	4,3	3,2	7,3	5,4	6,2	4,4
F	7,1	3,4	12,1	5,6	9,9	4,7
Total	34,3	21,9	56,7	36,2	46,9	29,7
TA(nc)	36%		36%		37%	

Le tableau 6.11 présente les sommes des *QE* moyen des trois métriques de chaque opérateur en fonction de chaque tâche. Les tâches les plus difficiles en T_0 sont B (avec 119), C (avec 105) et F (avec 66), ce qui correspond au même ordre que celui du groupe complet. Pour ce qui est des performances en T_1 , la tâche B (avec 64) demeure la plus difficiles suivie de A (avec 52) et D (avec 48). Le tableau 6.11 présente aussi le *CV* total selon en T_0 et T_1 , ce qui sert d'indication de la régularité de la performance lors de l'exécution des tâches. L'opérateur 1 a diminué son *CV* de 9%, l'opérateur 6 de 16% et l'opérateur 36 de 8%, ce qui indique une amélioration moyenne de la régularité des performances des opérateurs novices (par apprentissage) de 11%.

TABLEAU 6.11 RÉGULARITÉ DES PERFORMANCES DE TROIS OPÉRATEURS NOVICES SELON LA SOMME DES MÉTRIQUES

Tâche	Opérateur 1		Opérateur 6		Opérateur 36		Totaux	
	T_0	T_1	T_0	T_1	T_0	T_1	T_0	T_1
A	16	13	26	22	20	16	62	52
B	31	17	52	26	36	21	119	64
D	20	13	24	19	21	15	65	48
C	29	11	45	15	31	12	105	37
E	16	10	24	15	19	12	59	37
F	21	13	23	18	22	14	66	46
Moyenne	22	13	32	19	25	15	79	47
Écart-type	6	3	13	4	7	3	26	10
CV	29%	20%	39%	23%	29%	21%	32%	21%

En conclusion, les performances de ces novices s'améliorent selon deux aspects importants : le premier en valeur de performance absolue de 39,8% (moyenne des améliorations des tableaux 6.8 à 6.10), et le second en termes de régularité des performances de 11% sur leur CV pour des tâches de difficultés différentes.

6.4 Performances auto-référencées

Les résultats des analyses de variance avec mesures répétées sur les données des trois métriques pour l'ensemble des opérateurs novices sont présentés aux tableaux 6.12, 6.13 et 6.14.

TABLEAU 6.12 RÉSULTATS $QA(t)$ ET ANALYSES DE VARIANCE

Tâche	VC2D		RA3D		ME3D		Probabilité
	Moyenne	Écart type	Moyenne	Écart type	Moyenne	Écart-type	
A	1,08	0,27	1,00	0,22	0,92	0,18	* p = 0,039
B	1,03	0,22	0,93	0,18	1,04	0,24	p = 0,106
D	1,06	0,21	0,96	0,22	0,98	0,19	p = 0,286
C	1,03	0,21	0,96	0,21	1,01	0,15	p = 0,493
E	0,97	0,16	1,10	0,20	0,92	0,16	* p = 0,010
F	0,96	0,31	1,04	0,37	1,01	0,30	p = 0,691

Le tableau 6.12 présente deux tâches où l'analyse de variance a donné une différence de moyennes significatives entre les modalités de visualisation avec une probabilité inférieure au seuil de 0,05, c'est-à-dire les tâches A ($F=3,565$, $dl=35$, $p=0,039$) et E ($F=5,233$, $dl=35$, $p=0,010$). Pour la tâche A, l'analyse de contraste entre la modalité MA3D et VC2D a donné une différence significative avec une probabilité de $p=0,021$ ($t=2,408$, $dl=36$, $p=0,021$), ce qui suggère que la modalité ME3D est plus performante que la modalité VC2D. La figure 6.8 illustre ces résultats.

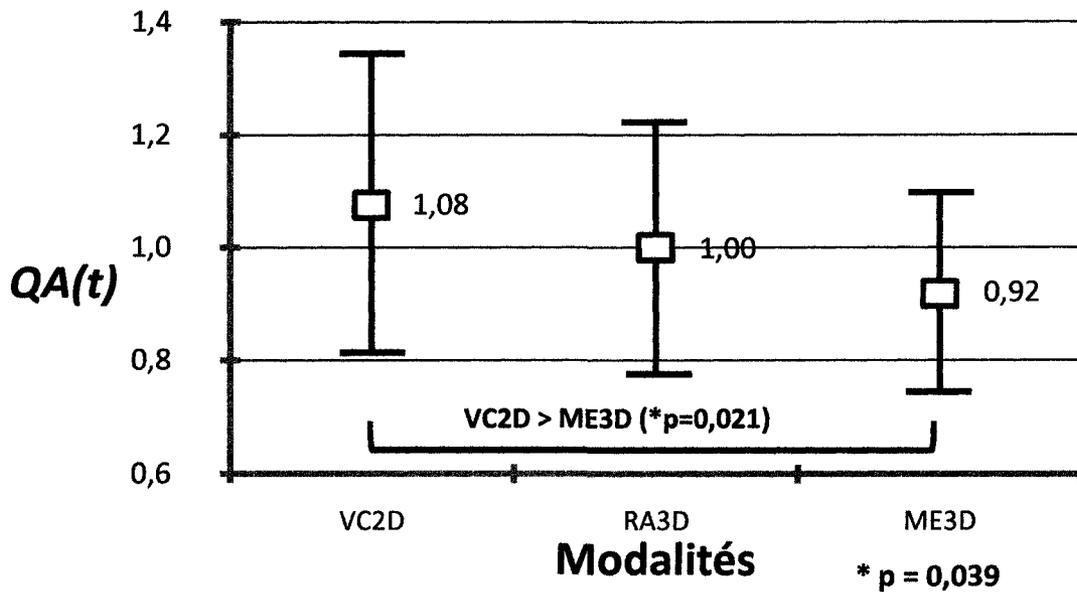


Figure 6.8 Analyse de contraste pour la tâche A selon $QA(t)$

Pour la tâche E, l'analyse de contraste ($t= 3,277$, $dl=36$, $p=0,002$) indique que la modalité ME2D est plus performante que la modalité RA3D. La figure 6.9 illustre cette situation.

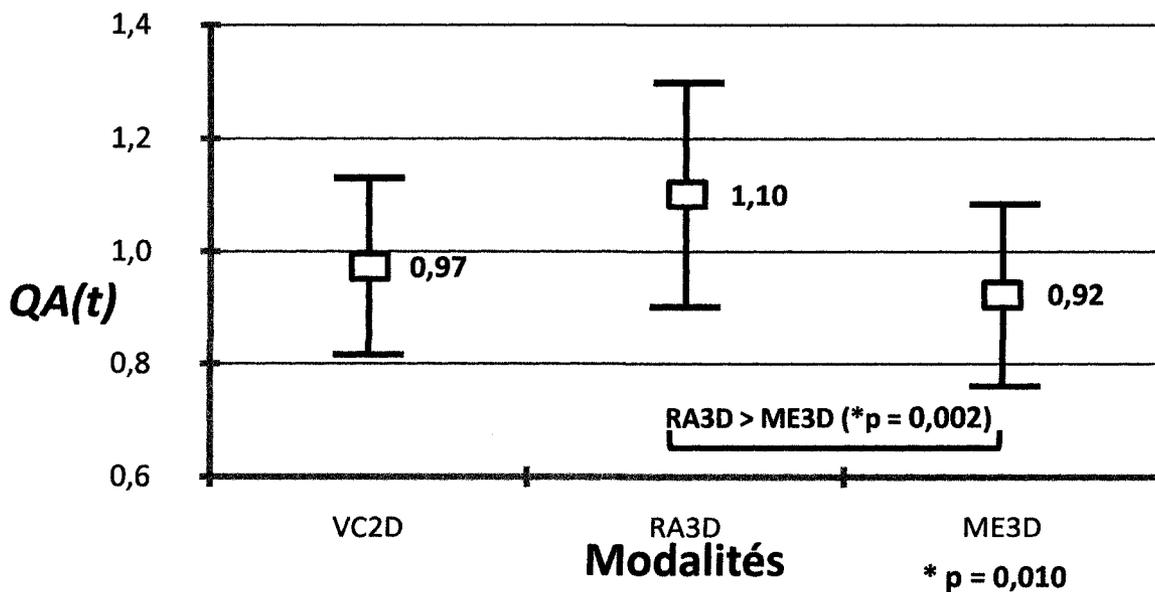


Figure 6.9 Analyse de contraste pour la tâche E selon $QA(t)$

Le tableau 6.13 présente les résultats des analyses de variance sur chacune des tâches selon $QA(d)$. Trois d'entre elles ont des différences de moyennes significatives entre

les modalités de visualisation avec une probabilité inférieure au seuil de 0,05, soient les tâches B ($F=6,871$, $dl=35$, $p=0,003$), D ($F=7,388$, $dl=35$, $p=0,003$) et C ($F=6,902$, $dl=35$, $p=0,002$).

TABLEAU 6.13 RÉSULTATS $QA(d)$ ET ANALYSES DE VARIANCE

Tâche	VC2D		RA3D		ME3D		Probabilité
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	
A	1,002	0,075	1,000	0,099	0,998	0,055	$p = 0,982$
B	0,995	0,108	0,949	0,084	1,057	0,132	* $p = 0,003$
D	1,020	0,089	0,957	0,074	1,023	0,068	* $p = 0,003$
C	0,999	0,061	0,968	0,060	1,033	0,058	* $p = 0,002$
E	0,996	0,053	0,999	0,053	1,005	0,047	$p = 0,824$
F	1,026	0,150	0,968	0,134	1,006	0,121	$p = 0,371$

Pour la tâche B, l'analyse de contraste ($t=-3,414$ $dl=36$, $p=0,002$) indique que la modalité RA3D est plus performante que la modalité ME3D. La figure 6.10 illustre cette situation.

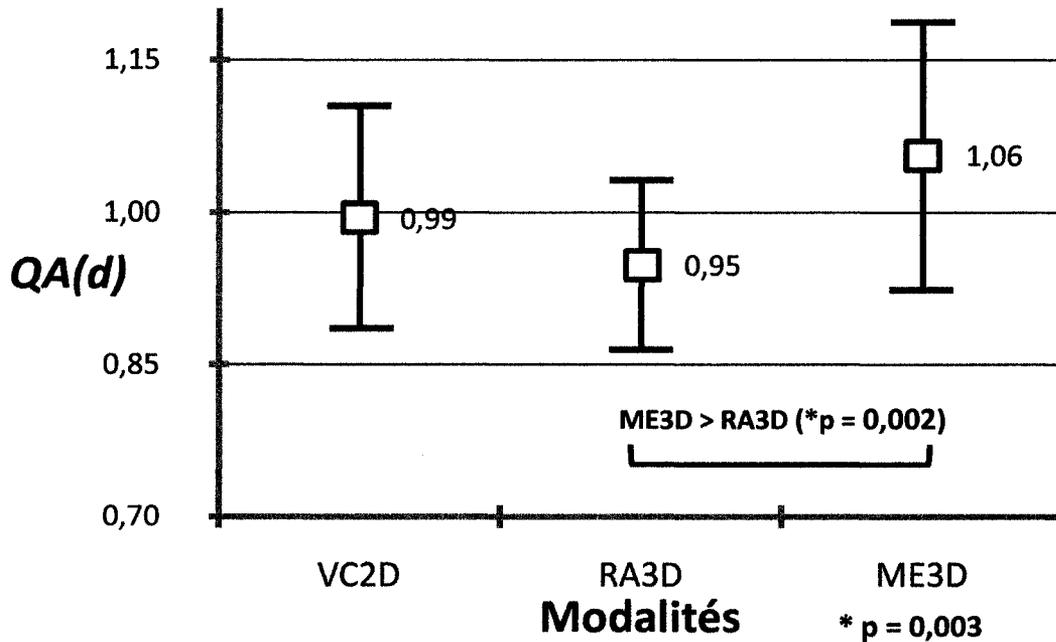


Figure 6.10 Analyse de contraste pour la tâche B selon $QA(d)$

Pour la tâche C, l'analyse de contraste ($t=-3,888$, $dl=36$, $p=0,001$) indique que la modalité RA3D est plus performante que la modalité ME3D. La figure 6.11 illustre cette situation.

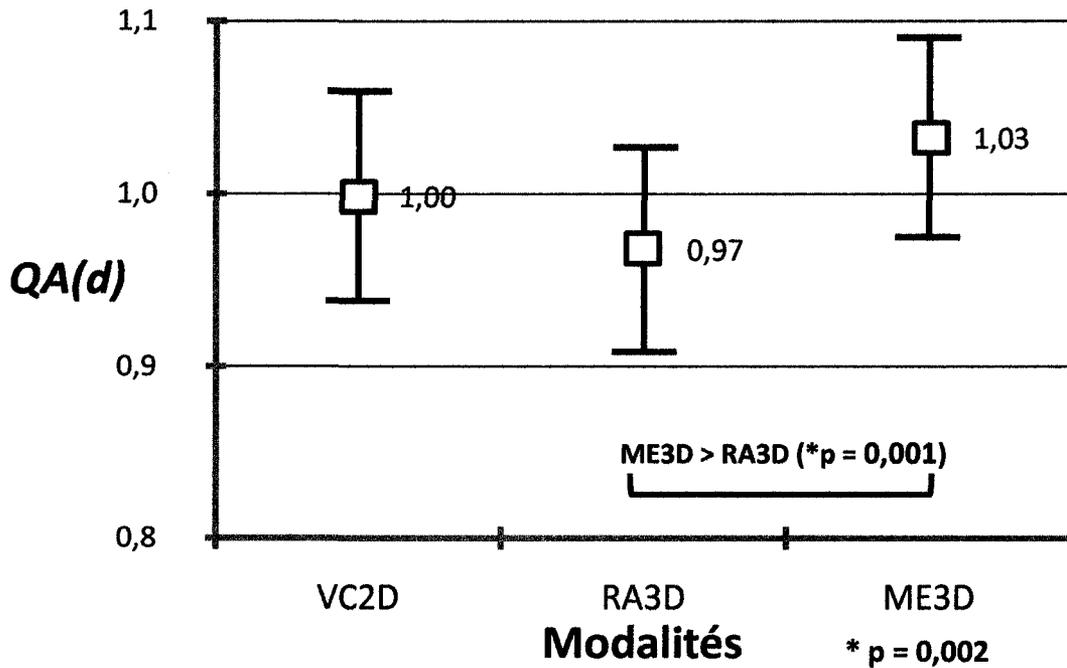


Figure 6.11 Analyse de contraste pour la tâche C selon $QA(d)$

Pour la tâche D, l'analyse de contraste indique que la modalité RA3D est plus performante que la modalité ME3D ($t=-3,607$, $dl=36$, $p=0,001$) et qu'elle est aussi plus performante que la modalité VC2D ($t= 2,584$, $dl=36$, $p=0,014$). La figure 6.12 illustre cette situation.

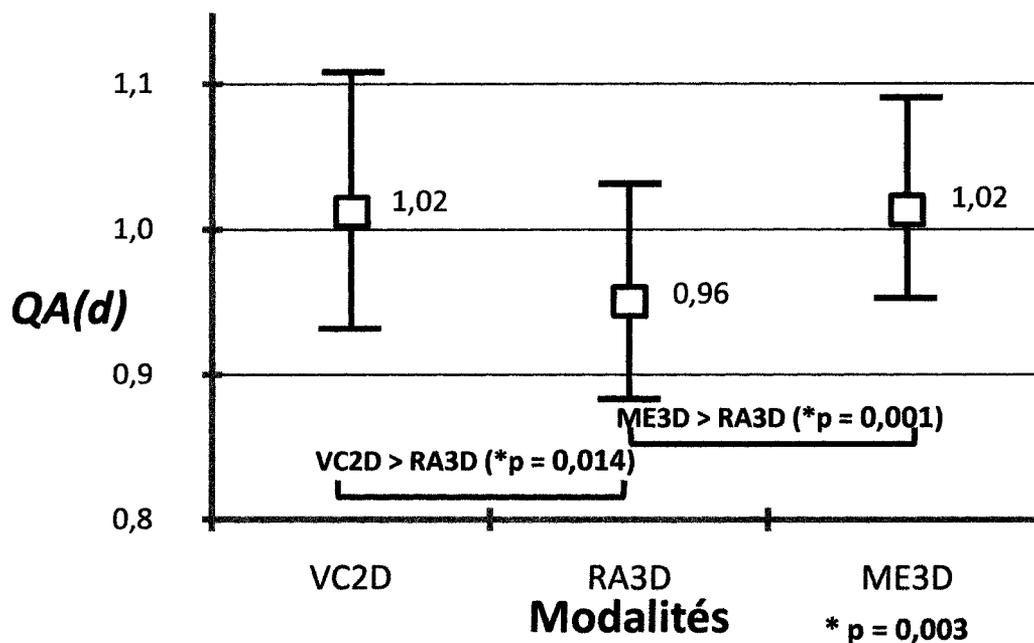


Figure 6.12 Analyse de contraste pour la tâche D selon $QA(d)$

Le tableau 6.14 présente les résultats des analyses de variances pour chacune des tâches selon $QA(nc)$. Seule la tâche A présente une analyse de variance avec une différence de moyennes significatives entre les modalités de visualisation avec une probabilité inférieure au seuil de 0,05, ($F=8,951$, $dl=35$, $p=0,001$).

TABLEAU 6.14 RÉSULTATS $QA(nc)$ ET ANALYSES DE VARIANCE

Tâche	VC2D		RA3D		ME3D		
	Moyenne	Écart type	Moyenne	Écart type	Moyenne	Écart type	
A	1,16	0,30	0,99	0,27	0,86	0,21	* $p = 0,001$
B	1,12	0,35	0,91	0,31	0,97	0,36	$p = 0,089$
D	1,03	0,33	1,02	0,35	0,95	0,27	$p = 0,553$
C	1,14	0,50	0,93	0,51	0,93	0,38	$p = 0,231$
E	0,94	0,42	1,20	0,49	0,86	0,44	$p = 0,056$
F	0,97	0,46	1,13	0,50	0,90	0,37	$p = 0,216$

Pour la tâche A, l'analyse de contraste ($t=4,1$, $dl=36$, $p=0,001$) indique que la modalité ME3D est plus performante que la modalité VC2D. Ceci est illustré à la figure 6.13.

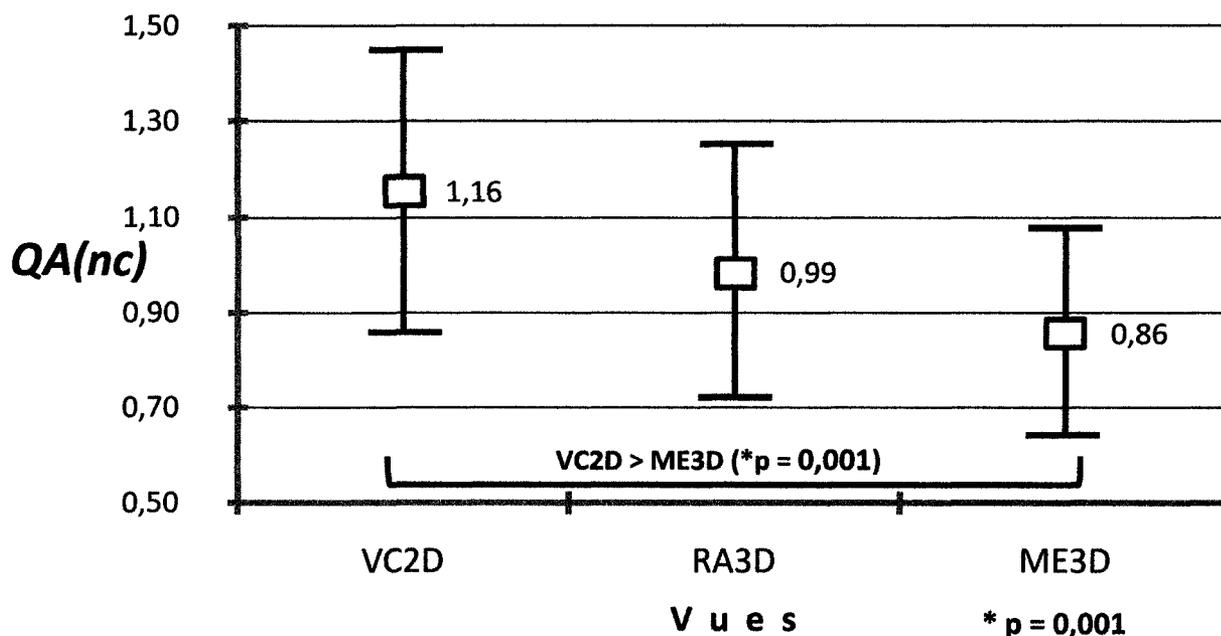


Figure 6.13 Analyse de contraste pour la tâche A selon $QA(nc)$

Dans l'ensemble, ces analyses présentent des différences significatives entre les modes de visualisation mais le nombre de résultats significatifs par tâches est quand même restreint : les tâches A et E pour t ; les tâches B, D, et C pour d ; la tâche A pour nc ; donc six sur un total de 18 possibilités (soit 33%). La modalité de visualisation ME3D se distingue pour les deux métriques t et nc où elle est plus performante que les deux autres modalités. Ces résultats suggèrent que la modalité ME3D permet de diminuer la charge cognitive des opérateurs, ce qui leur permet d'utiliser une plus grande vitesse de déplacement du robot lors des tâches. Pour la métrique de distance, c'est la modalité RA3D qui performe mieux. Cela suggère que la modalité RA3D favorise une meilleure précision des trajets sur les parcours.

6.4.1 Résultats des analyses de variance multi-facteurs

Question de voir si les caractéristiques des opérateurs novices influencent les performances observées, des analyses de variances multi-facteurs ont été effectuées. Tel

qu'indiqué au début du présent chapitre, les facteurs examinés sont le sexe, l'âge, le nombre d'heures de travail sur ordinateur et le nombre d'heures de jeux vidéo par semaine.

Le tableau 6.15 présente les résultats qui sont significatifs pour la caractéristique Sexe. Seule la tâche C fait ressortir une différence significative des moyennes des deux sous-groupes ($F=3,624$, $df=34$, $p=0,037$) pour la métrique t . Cette même tâche fait aussi ressortir une différence significative entre ces sous-groupes ($F=3,825$, $df=34$, $p=0,032$) pour la métrique d . La figure 6.14 présente le résultat de l'analyse de contraste qui indique que les femmes performant mieux avec la modalité ME3D que la modalité VC2D lors de la tâche C et selon la métrique t ($F=6,639$, $df=35$, $p=0,014$), alors que c'est l'inverse pour les hommes. La figure 6.15 illustre aussi que les femmes performant mieux avec la modalité ME3D que la modalité VC ($F=7,663$, $df=35$, $p=0,009$) lors de la tâche C et pour la métrique d , alors que c'est l'inverse pour les hommes.

TABLEAU 6.15 $QA(t)$ ET $QA(d)$ SELON LE SEXE DES OPÉRATEURS NOVICES POUR LA TÂCHE C

	Modalité	Femmes ($n = 20$)		Hommes ($n = 17$)		
		Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	
$QA(t)$ Tâche C	VC2D	1,084	0,221	0,967	0,172	* $p = 0,037$
	RA3D	0,955	0,231	0,960	0,197	
	ME3D	0,962	0,144	1,073	0,133	
$QA(d)$ Tâche C	VC2D	1,021	0,065	0,973	0,044	* $p = 0,032$
	RA3D	0,964	0,064	0,974	0,056	
	ME3D	1,016	0,039	1,053	0,070	

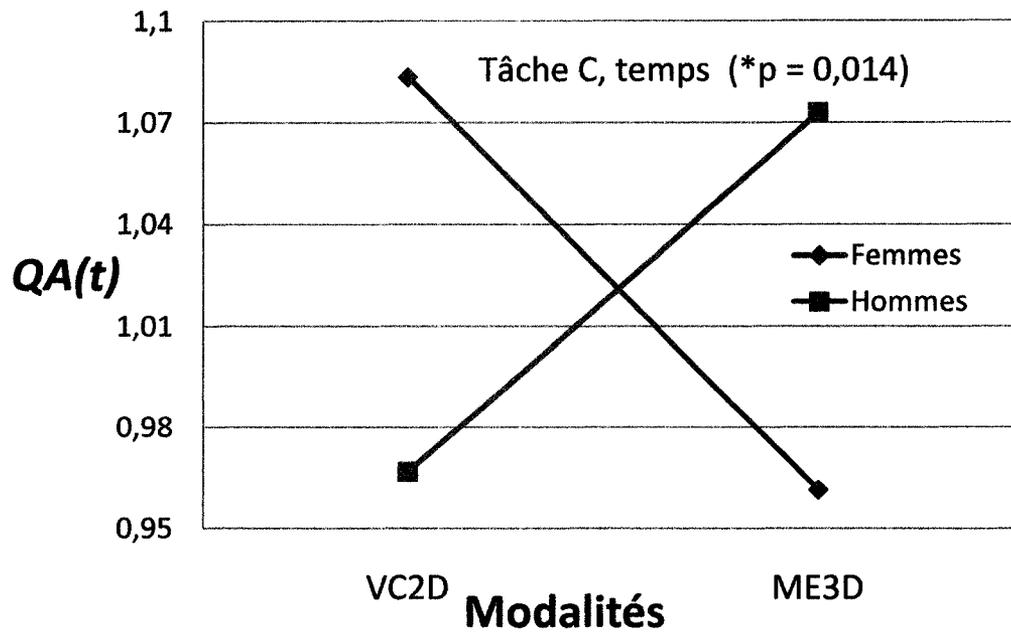


Figure 6.14 Analyse de contraste sur $QA(t)$ en fonction du sexe des opérateurs pour la tâche C

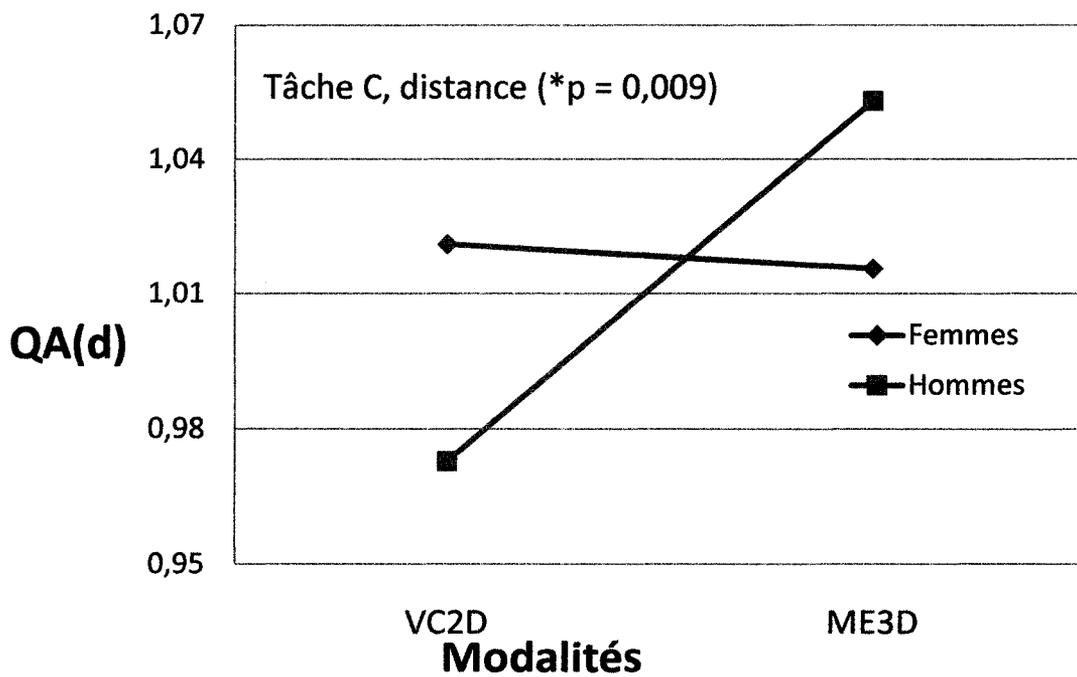


Figure 6-15 Analyse de contraste sur $QA(d)$ en fonction du sexe des opérateurs pour la tâche C

Le tableau 6.16 présente le résultat de l'analyse pour la caractéristique d'âge des opérateurs. Seule la tâche E avec la métrique d fait ressortir une différence significative des

moyennes des deux sous-groupes ($F= 4,590$, $dl=34$, $p=0,017$). La figure 6.16 montre pour cette tâche que les opérateurs dans le groupe de 30 ans et plus performent mieux avec la modalité ME3D que la modalité VC2D ($F=8,501$, $dl=35$, $p=0,006$), alors que c'est l'inverse pour les plus jeunes.

TABLEAU 6.16 $QA(d)$ SELON L'ÂGE DES OPÉRATEURS NOVICES POUR LA TÂCHE E

	Modalité	≤ 30 ans		> 30 ans		
		Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	
QA(d) Tâche E	VC2D	0,975	0,029	1,022	0,063	* p = 0,017
	RA3D	1,015	0,056	0,980	0,044	
	ME3D	1,010	0,044	0,998	0,050	

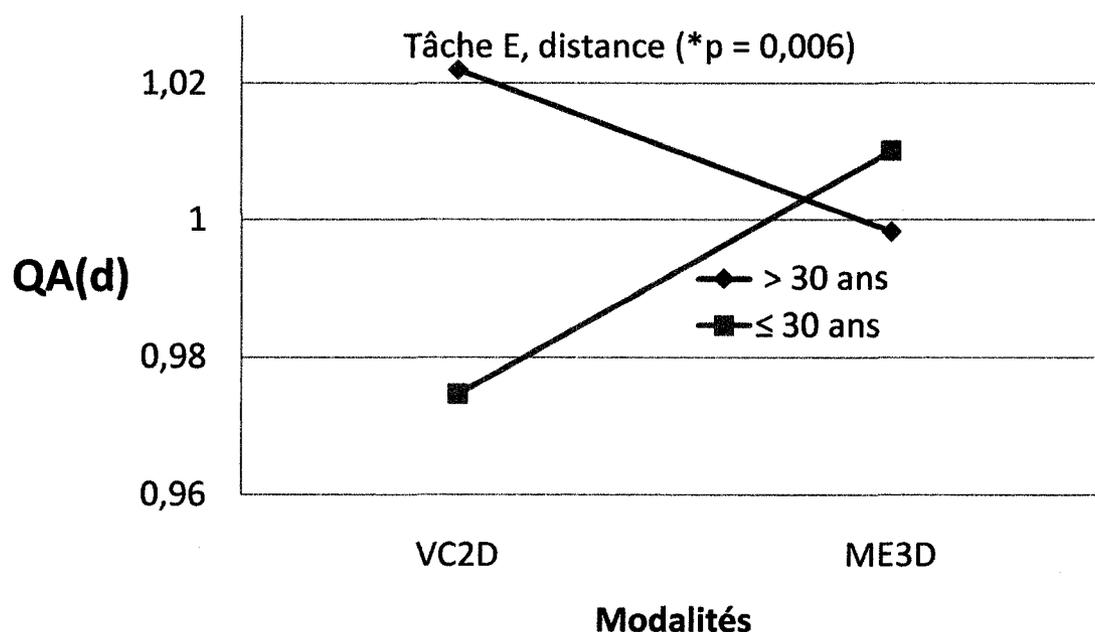


Figure 6.16 Analyse de contraste sur $QA(d)$ en fonction de l'âge des opérateurs pour la tâche E

Le tableau 6.17 présente le résultat de l'analyse pour la caractéristique du nombre d'heures de travail sur ordinateur par semaine. Seule la tâche E avec la métrique t fait ressortir une différence significative des moyennes des deux sous-groupes ($F= 4,561$, $dl=34$, $p=0,018$), tout comme pour la métrique nc ($F=5,935$, $dl=34$, $p=0,006$). La figure

6.17 montre que pour la métrique t de la tâche E, les opérateurs dans le groupe qui travaille 22 heures et moins sur ordinateur par semaine performent mieux avec la modalité ME3D que la modalité VC2D ($F=8,923$, $dl=35$, $p=0,005$), alors que c'est l'inverse pour ceux qui travaillent plus. La figure 6.18 montre pour la métrique nc de la tâche E que les opérateurs dans le groupe qui travaillent sur ordinateur 22 heures et moins par semaine performent mieux avec la modalité ME3D que la modalité VC2D ($F=11,538$, $dl=35$, $p=0,002$), alors que c'est l'inverse pour ceux qui travaillent plus. Pour la caractéristique du nombre d'heures de jeux par semaine, l'analyse n'a fait ressortir aucune dissociation des moyennes.

TABLEAU 6.17 $QA(t)$ ET $QA(nc)$ SELON LES HEURES DE TRAVAIL SUR ORDINATEUR PAR SEMAINE DES OPÉRATEURS NOVICES POUR LA TÂCHES E

	Modalité	≤ 22 heures		> 22 heures		
		Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	
$QA(t)$ Tâche E	VC2D	1,035	0,141	0,909	0,150	* $p = 0,018$
	RA3D	1,088	0,118	1,117	0,265	
	ME3D	0,878	0,114	0,974	0,193	
$QA(nc)$ Tâche E	VC2D	1,126	0,424	0,736	0,326	* $p = 0,006$
	RA3D	1,161	0,348	1,241	0,611	
	ME3D	0,714	0,269	1,024	0,530	

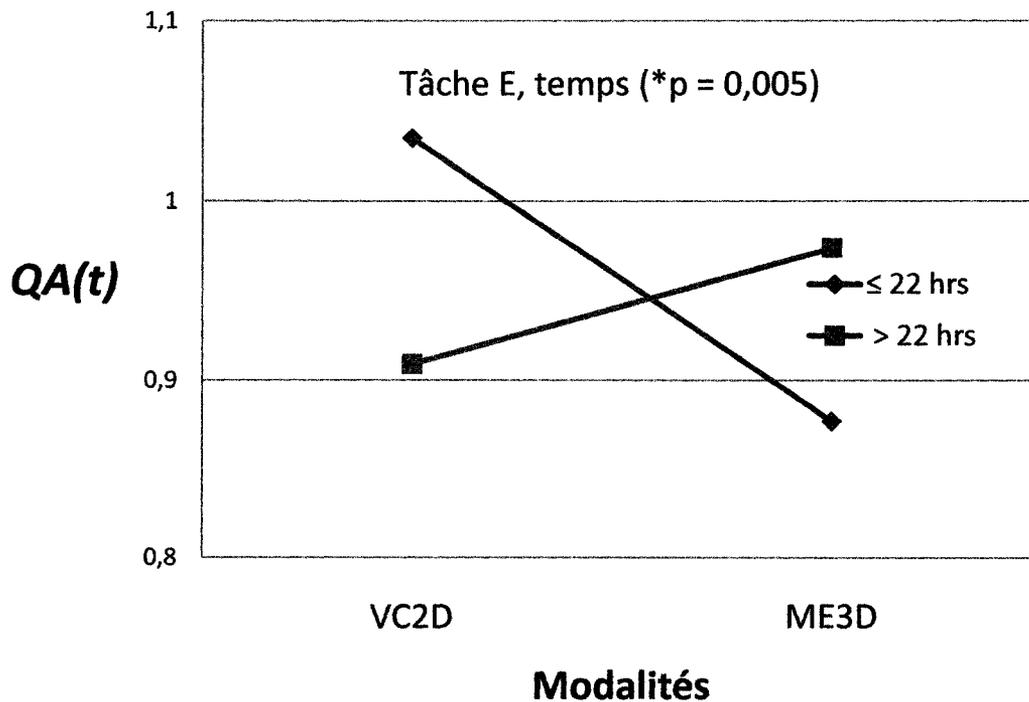


Figure 6.17 Analyse de contraste sur $QA(t)$ en fonction du nombre d'heures de travail sur ordinateur des opérateurs pour la tâche E

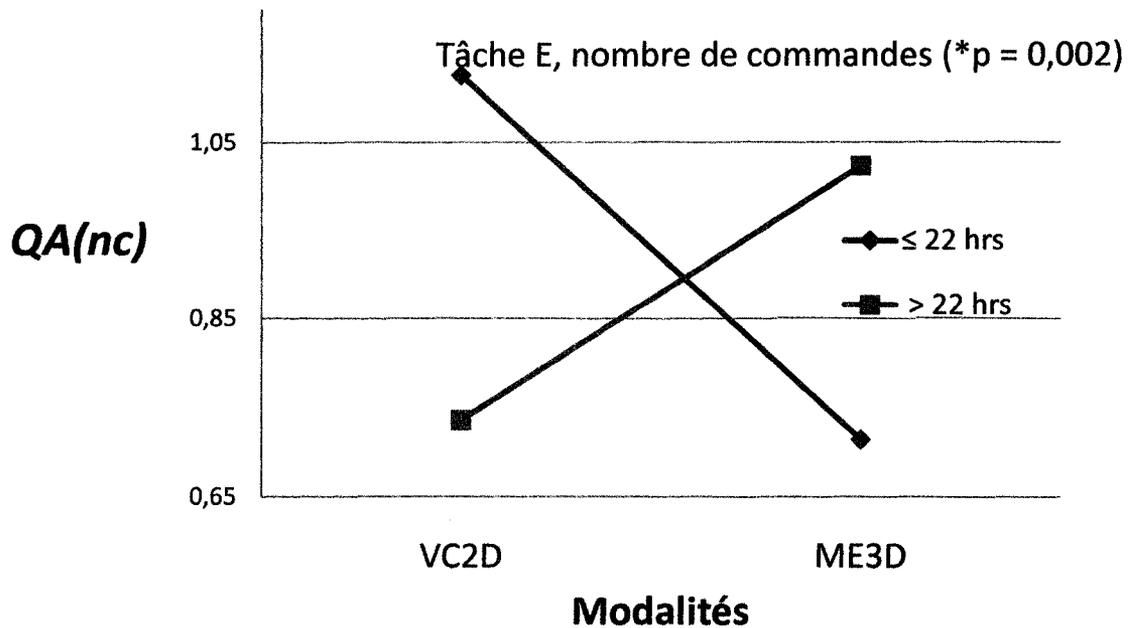


Figure 6.18 Analyse de contraste sur $QA(nc)$ en fonction du nombre d'heures de travail sur ordinateur des opérateurs pour la tâche E

Les conclusions globales qui peuvent être tirées de ces résultats sont que :

- 1) Les femmes ou les personnes de plus de 30 ans ou les personnes qui travaillent moins de 22 heures par semaine sur ordinateur performant mieux avec la modalité ME3D qu'avec la VC2D.
- 2) Les hommes ou les personnes de moins de 30 ans ou les personnes qui travaillent plus de 22 heures par semaine sur ordinateur performant mieux avec la modalité VC2D que la ME3D.

Donc, malgré le fait que globalement le groupe de novices performe mieux avec les modalités ME3D et RA3D, pour trois sous-groupes spécifiques il est suggéré que cette supériorité n'est pas constante. Ceci démontre entre autres que la modalité ME3D est supérieure à la modalité VC2D mais l'est encore plus pour certains utilisateurs spécifiques (voir conclusion 1). Ceci nous porte à croire qu'une interface-opérateur pouvant adapter la modalité de présentation selon l'utilisateur et la tâche aurait des performances encore plus élevées que ce que nous obtenons pour ce groupe de novices.

6.4.2 Résultats d'utilisabilité

Le tableau 6.18 présente les résultats concernant la facilité d'utilisation perçue mesurée par questionnaire. Le questionnaire (présenté à l'annexe E) est constitué de six questions évaluant pour chaque modalité, sur une échelle de Likert à neuf niveaux, la facilité d'utilisation et la performance perçues dans chaque tâche. Une analyse de variance sur les scores totaux montre des différences de moyennes entre les modalités de visualisation ($F=10,977$, $dl=35$, $p=0,001$), tableau 6.18. La modalité VC2D est perçue comme étant moins facile à utiliser que la modalité RA3D, tel que montré sur la figure 6.19. La modalité RA3D est aussi moins performante que la modalité ME3D. La modalité ME3D est donc perçue comme la plus facile à utiliser.

TABLEAU 6.18 PERCEPTION DE FACILITÉ PAR LES OPÉRATEURS NOVICES

Tâche	VC2D		RA3D		ME3D	
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
A	6,3	1,9	6,8	1,9	6,7	2,0
B	5,6	1,8	6,6	1,8	6,8	1,6
D	5,6	2,1	6,0	1,7	6,8	2,0
C	5,1	1,7	6,4	1,7	6,6	1,8
E	5,1	1,9	5,3	2,2	6,9	2,0
F	5,6	1,8	5,6	2,3	6,5	2,1
Total	33,5	11,3	36,7	11,6	40,3	11,5
Moyenne	5,6		6,1		6,7	

$F=10,977$, $dl=35$, $p=0,001$

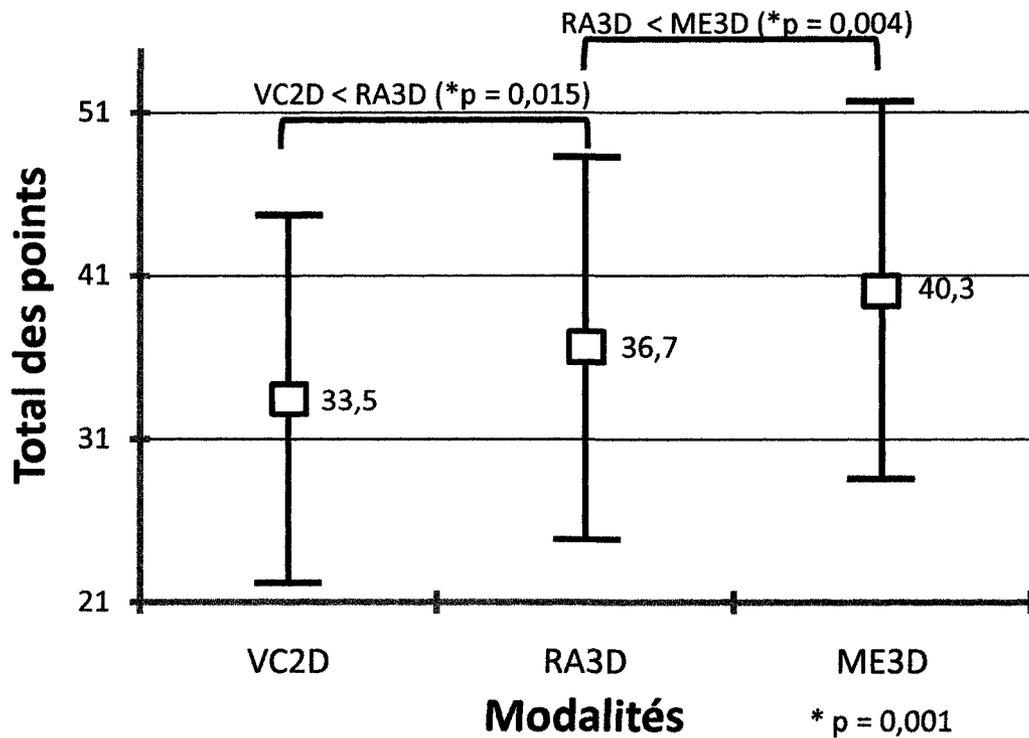


Figure 6.19 Analyse de contraste des perceptions de facilité pour chaque modalité

Le tableau 6.19 présente les résultats concernant la performance perçue par les opérateurs novices évaluée à partir des questionnaires d'utilisabilité. Une analyse de variance sur les scores totaux montre des différences de moyennes entre les modalités de visualisation ($F=7,605$, $dl=35$, $p=0,002$), tableau 6.19. Conséquemment, la modalité VC2D est perçue comme étant moins performante que la modalité ME3D.

TABLEAU 6.19 PERCEPTION DE PERFORMANCE PAR LES OPÉRATEURS

Tâche	VC2D		RA3D		ME3D	
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
A	6,4	1,88	7,0	1,7	7,1	1,6
B	5,8	1,96	6,7	1,7	6,8	1,6
D	5,8	2,00	6,1	1,9	6,6	2,0
C	5,6	1,61	6,6	1,8	6,8	1,7
E	5,6	1,79	5,6	2,1	6,8	1,9
F	6,0	1,83	5,7	2,2	6,5	1,9
Total	35,1	11,1	37,7	11,4	40,6	10,8
Moyenne	5,8		6,3		6,8	

F=7,605, dl=35, p=0,002

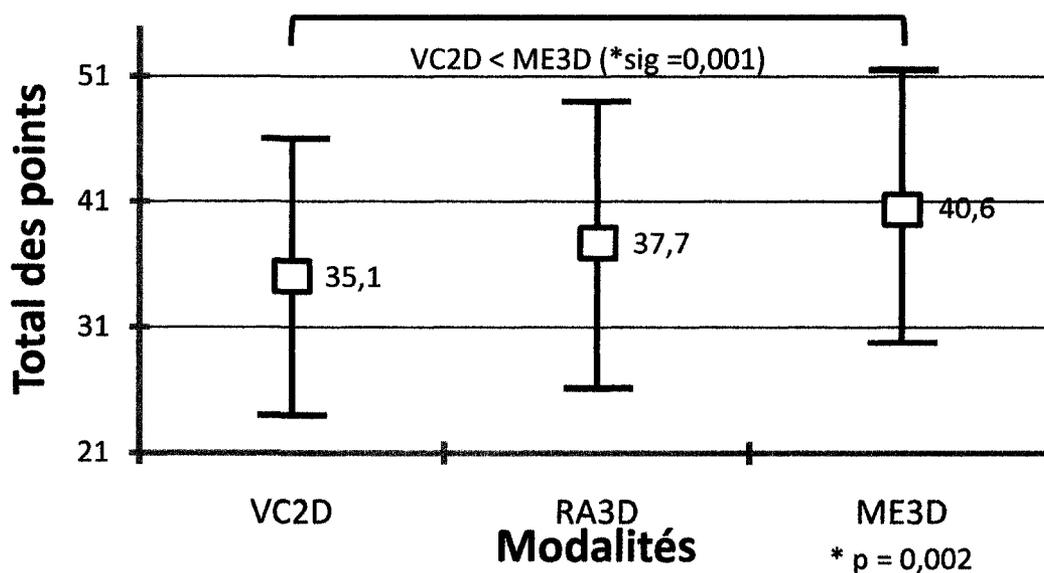


Figure 6.20 Analyse de contraste des perceptions de performance pour chaque modalité

Le questionnaire comportait enfin des questions sur la vitesse de navigation du robot. Le tableau 6.20 présente les opinions recueillies dans le questionnaire des opérateurs novices en rapport à la vitesse du robot. La vitesse est jugée correcte pour 89% des participants, alors qu'elle est trop rapide pour deux participants et trop lente pour trois autres.

TABLEAU 6.20 CHOIX DE LA VITESSE DU ROBOT PERMISE LORS DES TESTS

Vitesse du robot	Nombre	Pourcentage
Trop lente	3	8%
Correcte	32	89%
Trop rapide	2	6%

7 DISCUSSION ET CONCLUSION

L'hypothèse de recherche, telle que présentée à la section 3.7, est formulée ainsi:

Est-ce que les améliorations proposées au niveau de l'interface-opérateur en termes de visualisation de l'information vidéo intégré à un modèle 3D de l'environnement améliorent les performances d'opérateurs novices pour la téléopération d'un robot mobile ?

À cette fin deux modalités de visualisation intégrée, soit les modalités RA3D et ME3D, ont été conçues et comparées à une modalité VC2D. Comparativement aux études similaires présentées à la section 3.6 et comme le montre le tableau 7.1, notre étude s'effectue en considérant simultanément trois métriques quantitatives (t pour l'efficacité, d pour la précision et nc pour la charge cognitive et la sécurité) dans l'exécution de six tâches et avec la même plate-forme robotique. Notre étude implique aussi la sélection d'un ensemble de tests et d'opérateurs novices permettant de réaliser des analyses avec un échantillon significatif d'opérateurs permettant la réalisation d'analyses statistiques inférentielles. Ceci a pour but de faire la distinction entre les caractéristiques de ces opérateurs novices et le référencement de leurs performances par rapport à un opérateur expert (venant démontrer les performances quasi-optimales pouvant être obtenues dans les conditions expérimentales, qui incluent le système de téléopération avec ses limitations). Le référencement des performances par rapport à l'expert permet une caractérisation plus adéquate en considérant les limites pratiques d'utilisation du système par un humain. Il permet d'évaluer la difficulté des tâches les unes par rapport aux autres (principalement celles demandant des déplacements dans des espaces restreints ou des positionnements précis). Cette procédure ouvre la porte à des analyses comparatives indépendantes des plates-formes robotiques et des conditions expérimentales. L'auto-référencement des performances à l'intérieur du groupe d'opérateurs novices permet de caractériser les différences observées en fonction des caractéristiques du groupe et procure une distribution normale des résultats de notre groupe d'opérateurs novices. Une évaluation qualitative de la facilité d'utilisation a enfin été réalisée. Nous avons appliqué ces procédures sur des

données de performances selon quatre métriques, ce qui est en soit une amélioration par rapport à celles réalisées par les groupes de chercheurs répertoriés, comme le montre le tableau 7.2. Toutes ces contributions portant sur la méthodologie expérimentale s'avèrent un apport intéressant de nos travaux par rapport aux études réalisées jusqu'à maintenant dans le domaine.

TABLEAU 7.1 MÉTRIQUES D'ÉVALUATION

Étude	Utilisabilité	Charge cognitive	t	d	nc	Nb de collisions	Mission
BAKER 2004	√						Utiliser l'interface
KEYES 2006			√			√	Trouver 3 objets
RICKS 2004	√		√				Suivre points de position
BRUEMMER 2005	√	√					Tracer carte (% carte)
DRURY 2007	√ ³			√	√		Trouver victimes (%)
LABONTÉ 2007	√	√ (nc)	√	√	√	Collisions non permises	Déplacement, positionnement, poussée (100% complet)

TABLEAU 7.2 CONDITIONS D'EXPÉRIMENTATION

Étude	Interface-opérateur	Nb Opérateurs	Type d'opérateurs	Nb essais par opérateur	Comparaison
BAKER 2004	RA2D	5	Experts	nd	Subjective selon l'expérience des opérateurs
KEYES 2006	RA2D	19 (9 hommes, 10 femmes)	nd	2	Deux points de vue de la caméra
RICKS 2004	ME2½D	32	Expérience minimale	2	VC2D et ME2½D
BRUEMMER 2005	ME2½D	64	Grand public	2	VC2D et ME2½D
DRURY 2007	ME2½D	8 (7 hommes, 1 femme)	nd	24	VC2D et ME2½D
LABONTÉ 2007	RA3D et ME3D	37 (17 hommes, 20 femmes)	Novices	6	VC2D, RA3D et ME3D

³ Évaluation de la conscience de la situation SA (situation awareness) par la technique LASSO

De nos résultats, il ressort que les opérateurs novices subissent une charge cognitive cinq fois supérieure à celle de l'expert (voir figure 6.1), pour une réalisation équivalente des tâches (les parcours étant bien délimités et les distances totales à parcourir étant assez courtes) et une efficacité de près de 50% (ou un temps d'exécution deux fois plus long, indiquant que les vitesses commandées correspondent à environ la moitié de celles de l'expert). Les variations de distance proviennent principalement des petits écarts produits par un redressement du trajet du robot afin d'éviter les obstacles ou lors de passages de courbes trop prononcées. Cette métrique est influencée par la précision des opérateurs à bien diriger le robot. La métrique d s'est avéré très sensible aux bruits et aux limitations du système. L'évaluation de la précision des opérateurs avec cette métrique est donc limitée et devrait être reconsidérée lors d'expériences futures. Une approche de mesure basée sur les écarts gauche-droit de déplacements du robot par rapport à une trajectoire optimale serait plus appropriée.

Nos résultats suggèrent aussi que globalement, les modalités RA3D et ME3D améliorent les performances de téléopération de novices par rapport à la modalité VC2D. Plus spécifiquement, la modalité RA3D serait la meilleure en termes de facilité d'utilisation et de précision des déplacements. Dans les deux cas, la sécurité de la téléopération s'en trouve améliorée. La modalité RA3D produit un effet similaire au déplacement de la position de la caméra sur le robot, c'est-à-dire qu'elle rend la perspective légèrement exocentrique et élargit l'angle de vue. Le groupe de Baker et al. [BAKER 2004] avait noté une meilleure facilité d'opération en procédant ainsi mais sans fournir une démonstration quantitative de cette observation. Le groupe de Keyes et al. [KEYES 2006] avait quant à eux noté une diminution substantielle de la charge cognitive d'une modalité RA2D comparativement à une modalité VC2D. Nos résultats (selon la métrique nc) corroborent cette observation, mais notent des performances encore meilleures à ce niveau avec une modalité ME3D.

Les modalités ME2½D ET ME3D par rapport à la modalité VC2D serait plus performantes en termes d'efficacité et de charge cognitive. Combinant les résultats des études de Ricks et al. [RICKS 2004], Bruemmer et al. [BRUEMMER 2005] et Drury et al. [DRURY 2007], la modalité ME serait plus facile à utiliser et plus souvent préférée par les opérateurs car elle réduit la charge cognitive, augmente l'efficacité des téléopérations et

procure une meilleure conscience de la localisation. Nos résultats corroborent ces observations.

De plus, tout comme Drury et al. [DRURY 2007], nos résultats confirment que la modalité VC2D serait la meilleure chez certains opérateurs novices pour augmenter la conscience de l'environnement et des activités. Ce que nous avons observé dans l'échantillon que nous avons est que pour les hommes ou les personnes de moins de 30 ans ou celles travaillant plus de 22 hrs par semaine sur ordinateur, la modalité VC2D est plus performante, tandis que la modalité ME3D est meilleure avec les femmes ou les personnes de plus de 30 ans ou celles travaillant moins de 22 heures par semaine sur ordinateur. La visualisation des éléments de l'activité locale et de l'environnement immédiat serait plus importante pour la téléopération par le premier groupe, tandis que la localisation globale du robot dans l'environnement serait prédominante pour les performances du second groupe. Les tests avec l'expert ont révélé une tendance indiquant que l'efficacité était meilleure avec la modalité VC2D pour le parcours de la cuisine, mais avec la modalité ME3D dans le parcours du corridor. Ces résultats s'arriment aussi avec les tendances observées lors des pré-expérimentations (présentées au chapitre 2). Les deux opérateurs entraînés (3 heures d'entraînement) étaient des jeunes hommes travaillant plus de 22 heures par semaine sur ordinateur, et performaient mieux avec une interface-opérateur avec modalité VC2D (robot Coworker). Les deux opérateurs novices étaient un homme et une femme de plus de 30 ans, mais travaillant toutefois plus de 22 heures par semaine sur ordinateur. La meilleure modalité de visualisation était carte centrique (robot Magellan Teleop), ce qui s'apparente plus au mode ME3D. L'identification de ces caractéristiques chez les opérateurs ainsi que les conditions expérimentales affectant le choix de la modalité de visualisation est une contribution nouvelle par rapport à ce qui est présenté dans la littérature scientifique.

En plus d'établir des comparaisons avec une modalité conventionnelle de type VC2D, nos travaux présentent des analyses comparatives entre les modalités RA3D et ME3D nouvellement conçues. L'intégration de la vue vidéo avec un modèle 3D améliore clairement les performances de téléopération chez les opérateurs novices. La modalité RA3D serait meilleure en termes de précision des manœuvres, et la modalité ME3D serait meilleure pour la facilité d'utilisation et l'efficacité des téléopérations. Il y a donc certes des avantages à superposer une vue vidéo à un modèle 3D afin d'élargir l'angle de vue (ce

qui est fait avec la modalité RA3D), et d'utiliser une perspective de type CC sous forme de modèle 3D combiné avec une vue vidéo (ce qui est fait avec la modalité ME3D). Ces meilleures performances obtenues avec la modalité ME3D seraient dues à la perspective de type exocentrique (CC) parce qu'elle réduit la charge cognitive des opérateurs novices, ce qui permet de relier la perspective CC avec une augmentation de l'efficacité et de l'utilisabilité et la VC2D avec une meilleure précision.

Enfin, l'évaluation de l'effet d'entraînement des opérateurs novices (menée avec trois opérateurs répétant les tâches après un délai de trois semaines) nous permet d'identifier qu'avec deux heures d'utilisation (soit le temps requis pour réaliser les tests par un opérateur), les performances des novices s'améliorent globalement de 40%. Ces résultats nous amènent à suggérer un minimum de 2 à 4 heures d'entraînement pour des opérateurs novices. Il faut par contre noter que cet apprentissage est évalué selon l'emploi du mécanisme de commande par joystick virtuel et que l'emploi d'un autre mécanisme pourrait mener à des valeurs différentes.

Étant donné la nouveauté des contributions dans les modalités de visualisation de notre travail, l'interface-opérateur de téléopération a été conçue pour les fins de l'étude et non pour en faire un système optimal. Plusieurs améliorations ont été identifiées suite aux expériences réalisées, et qui pourraient servir à améliorer davantage les performances de téléopération du système dans ses déploiements futurs.

- Améliorer la précision de la localisation du robot dans l'environnement. Les imprécisions et oscillations observées ont un effet dérangeant sur les perceptions des opérateurs.
- Réduire le délai de traitement des commandes et des messages d'états du robot. Avec un contrôle par joystick ou volant virtuel, le système comporte un délai moyen d'action-réaction de 0,4 seconde, ce qui dépasse de 0,2 seconde le délai de rétroaction admissible d'un opérateur humain en commande directe [RASKIN 2004, SHEIK 2005]. De plus, le taux de traitement et de transmission des messages du robot n'est que de 5 fois par seconde, alors que celui des images vidéo est de 15 par secondes lors des expériences réalisées. Ceci a un impact sur la synchronisation des images vidéo avec le modèle 3D. Une façon de compenser ces limitations

technologiques serait d'utiliser d'autres modes de commande, comme les points de chutes, des trajectoires générées automatiquement ou des modes autonomes du robot [TSUMAKI 2000], bien sûr dans la mesure de ce qui est faisable technologiquement. Les modalités de téléopération sont alors contournées, ce qui n'est pas toujours possible à faire de manière sécuritaire.

- Améliorer la qualité du rendu des modèles 3D et extraire des informations de texture des images vidéo et les appliquer aux surfaces correspondantes du modèle. Les surfaces des modèles 3D actuels ne comportent pas de texture et affichent des couleurs ne correspondant pas exactement à celles des éléments réels de l'environnement, créant ainsi une certaine difficulté pour l'opérateur à les faire correspondre aux images vidéo.
- Intégrer un mécanisme de génération automatique du modèle de l'environnement et des objets, et leur mise à jour dynamique. Les vues vidéo dans les modalités RA3D et ME3D ne sont pas fusionnées avec les éléments des modèles 3D. De plus, la localisation du robot dans le modèle 3D comporte du bruit et des erreurs qui décalent le modèle par rapport à la vue vidéo.
- Ajouter les informations des divers senseurs de distance aux modalités de visualisation intégrée. Présentement, les informations des senseurs de distance ne sont pas intégrées ou fusionnées avec les interfaces-opérateurs de modalité RA3D et ME3D.
- Permettre un ajustement dynamique de la position et de l'angle du point de vue d'égocentrique à exocentrique. La modalité RA3D est uniquement égocentrique et ne permet pas d'avoir une vue légèrement exocentrique capable de montrer de façon plus appropriée le robot et les obstacles de part et d'autre. Le point de vue exocentrique de la modalité ME3D est fixe et trop distant de la scène selon la trajectoire empruntée par le robot. Il serait utile de permettre à l'opérateur de choisir la perspective visuelle, ou encore d'implémenter un mécanisme ajustant la perspective selon la tâche à réaliser et les caractéristiques de l'opérateur.
- Utiliser un modèle physique plus précis du robot et l'implanter dans l'algorithme d'extrapolation du comportement du robot. Le positionnement du robot dans

l'interface-opérateur ne tient pas compte des accélérations du robot, ce qui introduit des erreurs d'extrapolation de la position du modèle 3D et occasionne des décalages avec les images vidéo correspondantes.

- Tracer sur les cartes et la vue vidéo le trajet anticipé.
- Élargir l'angle de vue horizontale avec la modalité VC2D et RA3D.

Ces améliorations permettront d'obtenir une interface-opérateur plus performante pour conduire des études sur le choix des mécanismes de contrôle (en laboratoire), pour ensuite porter un choix éclairé sur l'interface-opérateur à utiliser afin de mener une étude clinique dans des domiciles réels. Selon les résultats de nos travaux et étant donné le type d'opérateurs qui utiliseront le système de téléopération (plus spécifiquement pour l'assistance dans la prestation de soins à domicile, c'est-à-dire des cliniciens et des aidants naturels), notre recommandation serait de favoriser la modalité ME3D de visualisation.

8 BIBLIOGRAPHIE

[ADAMS 2002] ADAMS, A. (2002) *Critical considerations for human-robot interface development*, AAAI Fall Symposium: Human Robot Interaction Technical Report, FS-0203, pp. 1-8.

[ALBUS 1991] ALBUS, J.A. (1991) *Outline for a theory of intelligence*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 21, no. 3, pp. 473-509.

[ANDERSON 2000] ANDERSON, M., MARTIN, K., WALSH, T. (2000) *The residential gateway: expanding the horizons of home networking*, citeseer.nj.nec.com/419782.html, 12 p.

[BAJCSY 1988] BAJCSY, R. (1988) *Active perception*, Proceedings IEEE, vol. 76, no. 8, pp. 96-1005.

[BAKER 2004] BAKER, M., CASEY, R., KEYES, B., YANCO, H.A. (2004) *Improved interfaces for human-robot interaction in urban search and rescue*, Proceedings of the IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics, vol. 3, pp. 2960-2965.

[BISCHOFF 1998] BISCHOFF, R. (1998) *Design concept and realization of the humanoid service robot HERMES*, Field and Service Robotics, Springer, London, pp. 485-492.

[BOISSY 2007] BOISSY, P., CORRIVEAU, H., MICHAUD, F., LABONTE, D., ROYER, M.P. (2007) *Exploring the potential use of home mobile telepresence for telehomecare: a qualitative study with healthcare professionals and community living elderly*, Journal of Telemedecine and Telecare.

[BRUCH 2000] BRUCH, M. H., RAIRD, R. T., EVERETT, H. R. (2000) *Challenges for deploying man portable robots into hostile environments*, SPIE Proceeding 4195, 12 p.

[BRUEMMER 2005] BRUEMMER, D. J., DOUGLAS, A. F., WALTON, M. C., BORING, R. L., MARBLE, J. L., NIELSEN, C. W., GARMER, J. (2005) *Turn off the television!: Real-world robotic exploration experiments with a virtual 3-D display*, Proceedings of the 38th Hawaii Conference on System Sciences.

[CASPER 2002] CASPER, J. (2002) *Human-robot interactions during the robot-assisted urban search and rescue response at the World Trade Center*, M.S. Thesis, Computer Science and Engineering Department, University of South Florida.

[CASPER 2003] CASPER, J., MURPHY, R. (2003) *Human-robot interactions during the robot-assisted urban search and rescue response at the World Trade Center*, IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, part B, vol. 33, pp. 367-385.

[CHUNG 1999] CHUNG, M., AKAHOSHI, M. (1999) *Reducing home nursing visit costs using a remote access infusion pump system*, Journal of Intravenous Nursing, vol. 22, no. 6, pp. 309-314.

[CICCIMARO 1998] CICCIMARO, D. A., EVERETT, H. R., GILBREATH, G. A., TRAN, T. T. (1998) *An automated security response robot*, SPIE Mobile Robots XIII, Boston, MA, 12 p.

[CLOUTIER 2007] CLOUTIER, R. (2007) *Conception électronique et informatique d'un robot mobile pour usage dans un environnement domiciliaire*, Mémoire de maîtrise, Département de génie électrique et de génie informatique, Université de Sherbrooke.

[COEN 1998] COEN, M.H. (1998) *Design principles for intelligent environments*, Proceedings of the 1998 National Conference on Artificial Intelligence, pp 547-554.

[CÔTÉ 2004] CÔTÉ, C., LÉTOURNEAU, D., MICHAUD, F., VALIN, J.M., BROSSEAU, Y., RAIEVSKY, C., LEMAY, M, TRAN, V. (2004) *Code reusability tools for programming robots*, Proceeding IEEE/RSJ International Conference on Robots and Intelligent Systems, pp. 1820-1825.

[CRANDALL 2005] CRANDALL, J.W., GOODRICH, M.A., OLSEN, D.R., NIELSEN, C.W. (2005) *Validating human-robot interaction schemes in multitasking environments*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Human, vol. 35, no. 4, July, pp. 438-449.

[DARIO 1999] DARIO, P., GUGLIELMELLI, E., LASCHI, C. TETI, G. (1999) *MOVAID: A personal robot in everyday life of disabled and elderly people*, Technology and Disability, vol. 10, no. 2, pp.77-93.

[DILGER 1998] DILGER, W. (1998) *A society of self-organizing agents in the intelligent home*, Intelligent Environments, 1998 AAAI Symposium, AAAI Press, pp. 55-59.

[DRASCIC 1996] DRASCIC, D., MILGRAM, P. (1996) *Perceptual issues in augmented reality*, SPIE Volume 2653: Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems III, Mark T. Bolas, Scott S. Fisher and John O. Merritt Editors, San Jose, California, pp. 123-134.

[DRAPER 1999] DRAPER, J. V., KABER, D. B., USHER, J. M. (1999) *Speculations on the value of presence*, Cyber Psychology & Behaviour, vol. 2, no. 4.

[DRURY 2003] DRURY, J. L., SCHOLTZ, J., YANCO, H.A. (2003) *Awareness in human robot interactions*, *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Washington D.C., pp. 568-573.

[DRURY 2007] DRURY, J. L., KEYES, B., YANCO, H.A. (2007) *LASSOing HRI: Analyzing situation awareness in map-centric and video-centric interfaces*, Proceedings of

the Second ACM SIGCHI/SIGART Conference on Human Robot Interaction, Virginia, USA, pp. 279-286.

[DUBOWSKY 2000] DUBOWSKY, S., GENOT, F., GODDING, S. KOZONO, H., (2000) *PAMM - A robotic aid to the elderly for mobility assistance and monitoring: a helping-hand for the elderly*, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), San Francisco, CA, vol.1, pp. 570-576.

[ENDO 2004] ENDO, Y., MACKENZIE, D. C., ARKIN, R.C. (2004) *Usability evaluation of high-level user assistance for robot mission specification*, Proceedings of IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics, Part C, 34:168-180.

[ENDSLEY 1988] ENDSLEY, M.R. (1988) *Toward a theory of situation awareness in dynamic systems*, Humans Factors, vol. 37, no. 1, pp. 32-64.

[FORLIZZI 2004] FORLIZZI, J., DISALVO, C., GEMPERLE, F. (2004) *Assistive robotics and ecology of elders living independently in their homes*, Human Computer Interaction, Lawrence Erlbaum Associates, vol. 19, pp. 25-59.

[FONG 2001] FONG, T., THROPE, C., BAUR, C. (2001) *A personal user interface for collaboration human-robot exploration*, International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics, and Automation in Space, Montréal, Canada.

[FONG 2003] FONG, T., NOURBAKHSH, I., DAUTENHAHN, K. (2003) *A survey of socially interactive robots*, Robotics and Autonomous Systems, vol. 42, pp. 143-166.

[GELIN 1997] GELIN, R., LESIGNE, B., DÉTRICHÉ, J. M. (1997) *Contributions of the French Atomic Energy Commission in Rehabilitation Robotics*.

[GIBSON 1979] GIBSON, J.J. (1979) *The Ecological Approach to Visual Perception*, Houghton Mifflin, Boston.

[GIROUX 2006] GIROUX, S., PIGOT, H., MOREAU, J., SAVARY, J. (2006) *Distributed mobile services and interfaces for people suffering from cognitive deficits*, Handbook of Research on Mobile Multimedia, pp. 544-554.

[GITLIN 2001] GITLIN, L.N., MANN, W., TOMIT, M., MARCUS, S.M. (2001) *Factors associated with home environmental problems among community-living older people*, Disability and Rehabilitation, vol. 23, no. 17, pp. 777-787.

[GOODRICH 2003] GOODRICH, M.A., BOER, E.R. (2003) *Model-based human centered task automation: A case study in ACC Design*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics- Part A: Systems and Humans, vol. 33, no. 3, pp. 325-336.

[GOODRICH 2004] GOODRICH, M. A. (2004) *Using models of cognition in HRI evaluation and design*, Proceedings of the AAAI 2004 Fall Symposium Series: The

Intersection of Cognitive Science and Robotics: From Interfaces to Intelligence, Arlington, Virginia.

[GOODRICH 2005] GOODRICH, M.A., RUPPER, R., NIELSEN, C.W. (2005) *Perceiving head, shoulders, eyes and toes in augmented virtuality interfaces for mobile robots*, IEEE International Workshop on Robots and Human Interaction Communication.

[HAEGELE 2001] HAEGELE, M., NEUGEBAUER, J., SCHRAFT, R. D. (2001) *From robots to robot assistants*, Proceedings of the 32nd International Symposium on Robotics.

[HAIGH 2002a] HAIGH, K. Z., YANCO, H.A. (2002) *Automation as caregiver: A survey of issues and technologies*, Proceedings of the AAAI-02 Workshop "Automation as Caregiver: The Role of Intelligent Technology in Elder Care", Edmonton, Alberta, Canada, July, pp. 39-53.

[HAIGH 2002b] HAIGH, K. Z., GEIB, C. W., MILLER, C. A. (2002) *Agents for recognizing and responding to the behavior of an elder*, Proceedings of the AAAI-02 Workshop "Automation as Caregiver: The Role of Intelligent Technology in Elder Care", Edmonton, Alberta, Canada, July, pp. 31-38.

[HOPPENOT 2001] HOPPENOT, P., COLLE, E. (2001) *Localisation and control of a rehabilitation mobile robot by close human-machine cooperation*, IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, vol. 9, no. 2, pp. 181-190.

[HUGHES 2003] HUGHES, S., MANOJLOVICH, J., GENNARI, J. (2003) *Camera control and decoupled motion for teleoperation*, Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, vol. 2, pp. 1339-1344.

[JACOFF 2000] JACOFF, A., MESSINA, E. E., EVANS, J., (2000) *A standard test course for urban search and rescue robots*, Proceedings of the Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop.

[JOHNSON 2003] JOHNSON, C. A., ADAMS, J. A., KAWAMURA, K. (2003) *Evaluation of an enhanced human-robot interface*, Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Washington, DC, pp. 900-905.

[KABER 2000] KABER, D.B., ONAL, E., ENDSLEY, M.R. (2000) *Design of automation for telerobots and the effect on performance, operator situation awareness, and subjective workload*, Human Factors and Ergonomics in Manufacturing, vol. 10, no. 4, pp. 409-430.

[KANDURI 2005] KANDURI, A. K., THOMAS, G., CABROL, N., GRIN, E., ANDERSON, R. C. (2005) *The (in) accuracy of novice rover operators' perception of obstacle height from monoscopic images*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, vol. 35, no. 4, pp 505-512.

[KAWAMURA 2003] KAWAMURA, K., NILAS, P., MUGURUMA, K., ADAMS, J.A., ZHOU, C. (2003) *An agent-based architecture for an adaptive human-robot interface*, Proceedings of the 36th Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii.

[KEYES 2006] KEYES, B., CASEY, R., YANCO, H.A., MAXWELL, B.A., GEORGIEV, Y. (2006) *Camera placement and multi-camera fusion for remote robot operation*, Proceedings of the IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, MD.

[LABONTE 2006a] LABONTE, D., MICHAUD, F., BOISSY, P., CORRIVEAU, H., CLOUTIER, R., ROUX, M.A. (2006a) *A pilot study on teleoperated mobile robots in home environments*, Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China, pp. 4466-4471.

[LABONTE 2006b] LABONTE, D., (2006) *Teleoperation transmission protocol*, Laborius Telerobot Project, Université de Sherbrooke, 22 p.

[LACEY 1998] LACEY, G., DAWSON-HOWE, K. M. (1998) *The application of robotics to a mobility aid for the elderly blind*, Robotics and Autonomous Systems, vol. 23, pp. 245-252.

[MANKOFF 1998] MANKOFF, J., SOMERS, J., ABOWD, G. D. (1998) *Bringing people and places together, intelligent environments*, 1998 AAAI Symposium, AAAI Press, pp. 168-172.

[McGOVERN 1988] McGOVERN, D., (1988) *Human interfaces in remote driving*, Technical report SAND88-0562, Sandia National Laboratory, Albuquerque, NM.

[MEIER 1999] MEIER, R., FONG, T.W., THORPE, C., BAUR, C. (1999) *A sensor fusion based user interface for vehicle teleoperation*, Proceedings of International Conference on Field and Service Robotics (FSR'99).

[MICHAUD 2008] MICHAUD, F., BOISSY, P., LABONTE, D., CORRIVEAU, H., GRANT, A., LAURIA, M., CLOUTIER, R., ROUX, M.-A., IANNUZZI, D., ROYER, M.-P. (2008) *A telementoring robot for home care*, Technology and Aging, selected papers from the 2007 International Conference on Technology and Aging, vol. 21, Assistive Technology Research Series.

[MILGRAM 1995] MILGRAM, P., DRASCIC, D., GRODSKI, J.J., RESTOGI, A., ZHAI, S., ZHOU, C. (1995) *Merging real and virtual worlds*, Proceedings of IMAGINE.

[MILLER 2002] MILLER, A. C., HAIGH, K., DEWING, W. (2002) *First, cause no harm: Issues in building safe, reliable and trustworthy elder care systems*, AAAI - 02 Workshop, Automation as Caregiver : The Role of Intelligent Technology in Elder Care, WS-02-02, pp. 80-84.

- [MINSKY 1980] MINSKY, M. (1980) *Telepresence*, Omni, pp. 45-51.
- [MONTEMERLO 2003] MONTEMERLO, M., ROY, N., THRUN, S. (2003) *Perspectives on standardization in mobile robot programming: The Carnegie Mellon navigation (CARMEN) toolkit*, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2436-2441.
- [MONTFERRER 2002] MONTFERRER, A., BONYUET, D. (2002) *Cooperative robot teleoperation through virtual reality interfaces*, Proceedings of Sixth International Conference on Information Visualisation, pp. 243-248.
- [MORAN 1999] MORAN, B. (1999) *High-tech home is habitat for lifestyle computing*, Atlanta Business Chronicle.
- [MYNATT 2000] MYNATT, E.D., ESSA, I., ROGERS, W. (2000) *Increasing the opportunities for aging in place*, citeseer.nj.nec.com/454709.html, 6 p.
- [NEWMAN 1995] NEWMAN, W., LAMMING, M. (1995) *Interactive System Design*, Addison-Wesley, New-York.
- [NIELSEN 2005] NIELSEN, C.W., GOODRICH, M.A., RUPPER, R.J. (2005) *Towards facilitating the use of a pan-tilt camera on a mobile robot*, IEEE International Workshop on Robotics and Human Interactive Communication, pp. 568-573.
- [NOKATA 2004] NOKATA, M., TEJIMA, N. (2004) *A safety strategy for rehabilitation robots*, Advances in Rehabilitation Robotics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, LNCS 306, pp.177-185.
- [OLSEN 2003] OLSEN, D.R., GOODRICH, M.A., (2003) *Metrics for evaluating human-robot interactions*, Proceeding of Performance Metrics for Intelligent Systems PERMIS.
- [OTMANE 2000] OTMANE, S., COLLE, E., MALLEM, M., HOPPENOT, P. (2000) *Disabled people assistance by a semiautonomous robotic system*. SCI'2000, - Virtual Engineering and Emergent Computing, Orlando, Florida, USA, vol 3. pp.684-689.
- [OTT 2005] OTT, R., GUTIÉRREZ, M., THALMANN, D., VEXO, F. (2005) *VR haptic interfaces for teleoperation: an evaluation study*, Proceedings of Intelligent Vehicles Symposium, pp. 789-794.
- [PAPAGEORGES 2001] PAPAGEORGES, M., HEBERT, P. (2001) *Telemedicine using standard internet technologies*, Clinical Techniques in Small Animal Practice, vol. 16 , no. 2, pp. 102-106.
- [PAULOS 1998] PAULOS, E., CANNY, J. (1998) *PRoP: Personal roving presence*, ACM, SIGCHI Conference on Human Factors in Computing, Los Angeles, April, pp. 296-303.

[PAULOS 1996] PAULOS, E., CANNY, J. (1996) *Delivering real reality to the World Wide Web via telerobotic*, Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 2, pp. 1694-1699.

[POLLACK 2002] POLLACK, M.E., BROWN, L., COLBRY, D., OROSZ, C., PEINTNER, B., RAMAKRISHNAN, S., ENGBERG, S., MATTHEWS, J.T., DUNBAR-JACOB, J., MCCARTHY, C.E., THRUN, S., MONTEMERLO, M., PINEAU, J., ROY, N. (2002) *Pearl: A mobile robotic assistant for the elderly*, Proceedings of the AAAI-02 Workshop "Automation as Caregiver: The Role of Intelligent Technology in Elder Care", Edmonton, Alberta, Canada, July, pp. 85-91.

[PREECE 2002] PREECE, J., ROGERS, Y., SHARP, H. (2002) *Interaction Design Beyond Human-Computer Interaction*, John Wiley & Sons, Inc.

[RASMUSSEN 1982] RASMUSSEN, J., (1982) *Human error. A taxonomy for describing human malfunction in industrial installations*, Journal of Occupational Accidents, pp. 311-333.

[RASMUSSEN 1983] RASMUSSEN, J. (1983) *Skills, rules, and knowledge; signals, sings, and symbols, and other distinctions in human performance models*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. SMC-13, no. 3.

[RASKIN 2000] RASKIN, J., (2000) *The Human Interface*. Addison Wesley, ACM press.

[RILEY 2004] RILEY, J. M., BAKER, D. B., DRAPER, J. V. (2004) *Situation awareness and attention allocation measures for qualifying telepresence experiences in teleoperation*, Human Factors and Ergonomics in Manufacturing, vol. 14, no. 1, pp. 51-67.

[RICKS 2004] RICKS, B., NIELSEN, C.W., GOODRICH, M.A. (2004) *Ecological displays for robot interaction: A new perspective*. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan, vol. 3, pp. 2855-2860.

[ROY 2000] ROY, N., BALTUS, G., FOX, D., GEMPERLE, F., GOETZ, J., HIRSCH, T., MARGARITIS, D., MONTEMERLO, M., PINEAU, J., SCHULTE, J., THRUN, S., (2000) *Towards personal service robots for elderly*, Workshop on Interactive Robots and Entertainment.

[SAUCIER 1992] SAUCIER, A. (1992) *Le portrait des personnes ayant des incapacités au Québec en 1986*. Édition MSS, Montréal, Québec.

[SANTÉ-CANADA 1999] SANTÉ-CANADA (1999) *La santé et le bien-être, dans les défis d'une société canadienne vieillissant*, Conseil consultative national sur le troisième âge, Santé Canada (ed), Ottawa, Ontario.

[SAWARAGI 2000] SAWARAGI, T., SHIOSE, T., AKASHI, G. (2000) *Foundations for designing an ecological interface for mobile robot teleoperation*, Robotics and Autonomous Systems, vol. 31, pp. 193-207.

[SCHAEFFER 1999] SCHAEFFER, C., MAY, T. (1999) *Care-O-Bot: A system for assisting elderly or disabled persons in home environments*. Proceedings of Assistive Technology on the Threshold of the New Millennium: Aaate 99, 5th European Conference for the Advancement of Assistive Technology.

[SCHRAFT 1999] SCHRAFT, R.D., SCHAFFER, C., MAY, T. (1999) *Care-O-Bot: The concept of a system for assisting elderly or disable persons in home environments*, Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, vol. 4, pp. 2476-2481.

[SCHRAFT 2000] SCHRAFT, R.D., SCHAFFER, C., MAY, T. (2000) *A mobile robot platform for assistance and entertainment*. Proceedings of Intelligent Systems and Robot, Montréal.

[SHEIK 2005] SHEIK, M.A., KABER, D.B., CHOW, M. (2005) *Control gain adaptation*, Human Factors and Ergonomics in Manufacturing, vol. 15, no. 3, pp. 259-274.

[SHERIDAN 1992] SHERIDAN, T. (1992) *Telerobotic, Automation, and Human Supervisory Control*, MIT Press, Cambridge.

[SCHOLTZ 2004] SCHOLTZ, J. C., YOUNG, J.D., DRURY, J.L., YANCO, H.A. (2004) *Evaluation of human-robot interaction awareness in search and rescue*, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 3, pp. 2327-2332.

[SCHOLTZ 2005] SCHOLTZ, J. C., ANTONISHEK, B., YOUNG, J. D., (2005) *Implementation of a situation awareness assessment tool for evaluation of human-robot interfaces*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, vol. 35, no. 4, pp. 450-459.

[STEINFELD 2004] STEINFELD, A. (2004) *Interface lessons for fully and semi-autonomous mobile robots*, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation, New Orleans, LA, pp. 2752-2757.

[STEUER 1992] STEUER, J. (1992) *Defining virtual reality: Dimensions determining telepresence*, Journal of Communication, vol. 42, no. 4, pp. 73-93.

[STIEFELHAGEN 1998] STIEFELHAGEN, R., YANG, J., WAIBEL, A., (1998) *Towards tracking interaction between people*, Intelligent Environments, AAAI Symposium, pp. 123-127.

[TEJIMA 2000] TEJIMA, N. (2000) *Rehabilitation robotics: A review*, Advanced Robotics, vol. 14, no 7, pp. 551-564.

[THOMAS 1997] THOMAS, G., ROBINSON, W.D., DOW, S. (1997) *Improving the visual experience for mobile robotics*, Seventh annual Iowa Space Grant Proceedings, Drake University, pp. 10-20.

[THOMPSON 2000] THOMPSON, R.L., DANIEL, R.W., MURRAY, D.W. (2000) *Experiments on operator matching in visual teleoperation*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 2, pp. 931-936.

[TOPALIS 2000] TOPALIS, E., ORPHANOS, G., KOUBIAS, S., PAPADOPOULOS, G. (2000) *A generic network management architecture targeted to support home automation networks and home internet connectivity*, IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 46, no 1, pp. 44-50.

[TROUVAIN 2003] TROUVAIN, B., WOLF, H., SCHNEIDER, F., (2003) *Impact of autonomy in multi-robot systems on teleoperation performance*, Proceedings of NRL Workshop on Multi-Robot Systems, Washington, DC.

[TSUMAKI 2000] TSUMAKI, Y., GOSHOZONO, T., ABE, K., UCHIYAMA, M., KOEPPE, R., HIRZINGER, G. (2000) *Verification of an advanced space teleoperation system using Internet*, Proceedings IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, March, vol. 2, pp. 1167-1172.

[VINCENTE 1990] VINCENTE, K., RASMUSSEN, J., (1990) *The ecology of human-machine systems II: Mediating "direct perception" in complex work domain*, Ecology and Psychology, vol. 2, no. 3, pp. 207-249.

[VOSHELL 2005] VOSHELL, M., WOODS, D.D., WILLIPS, F. (2005) *Overcoming the keyhole in human-robot coordination: Simulation and evaluation*, Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 49th Annual Meeting, Orlando.

[WANG 2001] WANG, W.C.T. (2001) *The design of multimodal human-machine interface for teleoperation*, Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, October 2001, pp. 3187-3192.

[WANG 2004] WANG, J., LEWIS, M., HUGHES, S. (2004) *Gravity-referenced attitude display for teleoperation of mobile robots*, Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 48th Annual Meeting, pp. 2662-2666.

[WICKENS 2000] WICKENS, C. D., HOLLANDS, J. G., (2000) *Engineering Psychology and Human Performance*, Third edition, Prentice Hall, Upper Saddle River NJ.

[WOODS 2004] WOODS, D. D., TITTLE, J., FEIL, M., ROESLER, A. (2004) *Envisioning human-robot coordination in future operations*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C, Vol. 34, No. 2, pp. 210-217.

[YANCO 2004a] YANCO, H. A., DRURY, J. (2004) *"Where Am I?" Acquiring situation awareness using a remote robot platform*, Proceedings of the IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics, October, vol. 3, pp. 2835-2840.

[YANCO 2004b] YANCO, H. A., DRURY, J. (2004) *Classifying human-robot interaction: An updated taxonomy*, Proceedings of the IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics, October, vol. 3, pp. 2841-2846.

ANNEXE A – Questionnaire d’expériences pilotes

Question sur la plateforme CoWorker : Selon vous, indiquez le niveau de difficulté rencontré lors des opérations suivantes :

F facile indiquant que vous avez du premier essai, rapidement et sans aucun problème réalisé la commande
A acceptable indiquant que vous avez eu un petit problème, ou n’étiez pas assez rapide ou vous avez repris un essai

D difficile indique plus d’un problème mais réalisable

T très difficile, à nécessité de l’aide du superviseur ou un temps de réflexion appréciable de votre part ou une habileté importante

I impossible, vous n’avez pu réaliser la commande correctement ou la compléter

F facile **A** acceptable **D** difficile **T** très difficile **I** impossible

Opérations	Niveau de difficulté	Commentaires
	F A D T I	
Reculer le robot dans sa position station de repos		
Sortir le robot de sa station de repos		
Passage au travers d’un cadre de porte		
Positionner le robot devant une personne et pointer son visage		
Tourner un coin de corridor		
Contourner un plan de travail dans une cuisine		
Suivre une personne		
Déplacer un petit obstacle sur le trajet (ballon, porte entre ouverte, etc.)		
Naviguer par point de chute		
Naviguer en mode Go (sans évitement)		
Naviguer en donnant plusieurs points de chute pour accélérer le déplacement du robot (avant qu’il ait atteint celui en cours).		
Naviguer en pas à pas (flèches sur le clavier)		

Qualifiez les éléments de la PFRT CoWorker

Échelle de valeur :

0 inapproprié 1 faible 2 moyen 3 adéquat 4 excellent 5 Sur performant

0 inapproprié, indique quelque chose d'inacceptable pour fonctionner efficacement et sécuritairement, doit être modifié

1 faible, doit être amélioré

2 moyen, est acceptable comme tel, mais devrait être amélioré

3 adéquat, est correct sans amélioration

4 excellent, à conserver

5 sur performant, dépasse les exigences de la fonction

Échelle de valeur :

0 inapproprié 1 faible 2 moyen 3 adéquat 4 excellent 5 Sur performant

Éléments		Qualification						Défauts
		0	1	2	3	4	5	
Image vidéo de la scène	Globalement							
	Grandeur							
	Vitesse de rafraîchissement							
	Précision							
	Zoom							
	Stabilité lors de déplacements							
	Angle de vue							
	Mir et guide dans l'image							
	Point de chute							

Image des senseurs de navigation	Globalement		
	Balayage avant		
	Proximité		
	Choc		
Indicateurs d'états et de commandes	Globalement		
	Batteries		
	Téléphone		
	Microphone		
	Go		
	Arrêt d'urgence		
	Flèches de commande		
	Bande d'angles de rotation		
	Cou		
	Tête		
	Zoom		
	Qualité de la disposition des icônes		

Carte des senseurs	Globalement		
	Position de la fenêtre (haut et gauche)		
	Dimension		
	Utilité		
	Précision		
Commandes	Globalement		
	Facilité à utiliser : cou		
	Facilité à utiliser : tête		
	Facilité à utiliser : zoom		
	Facilité à utiliser : flèches		
	Facilité à utiliser : rotation		
	Facilité à utiliser : point de chute		
	Facilité à utiliser : Go devant obstacles		
	Facilité à utiliser : carte des senseurs lors de déplacement		
	Facilité à reculer		
	Facilité à passer près d'objets		
	Facilité à passer une porte		
	Facilité à déplacer un obstacle		
	Vitesse d'exécution des commandes		
	Vitesse du robot		
	Niveau de sécurité		
Lien audio	Globalement		
	Qualité de l'écoute		
	Qualité de conversation		
	Facilité d'utilisation		
	Niveau de bruits		
Plateforme de téléopération			
	Facilité d'apprentissage		
	Facilité à opérer dans un domicile		
	Ergonomie de l'interface		
	Performance du robot		
	Maniabilité		
	Sécurité de la PFRT		

Quels sont les défauts à corriger, les manques à combler et les améliorations essentielles pour faciliter l'opération sécuritaire des PFRT ?

Autres commentaires :

Question sur la plateforme MagLab

Selon vous indiquez le niveau de difficulté rencontré lors des opérations suivantes :

F facile indiquant que vous avez du premier essai, rapidement et sans aucun problème réalisé la commande

A acceptable indiquant que vous avez eu un petit problème, ou n'étiez pas assez rapide ou vous avez repris un essai

D difficile indique plus d'un problème mais réalisable

T très difficile, à nécessité de l'aide du superviseur ou un temps de réflexion appréciable de votre part ou une habileté importante

I impossible, Vous n'avez pu réaliser la commande correctement ou la compléter

F facile **A** acceptable **D** difficile **T** très difficile **I** impossible

Opérations	Niveau de difficulté F A D T I	Commentaires
Reculer le robot dans sa position station de repos		
Sortir le robot de sa station de repos		
Passage au travers d'un cadre de porte		
Positionner le robot devant une personne		
Tourner un coin de corridor		
Contourner un plan de travail dans une cuisine		
Suivre une personne		
Déplacer un petit obstacle sur le trajet (soulier, jeu, boîte, porte entre ouverte, etc.)		
Naviguer par point sur la carte		
Naviguer avec le joystick		

Qualifiez les éléments de la PFRT MagLab

0 inapproprié, indique quelque chose d'inacceptable pour fonctionner efficacement et sécuritairement, doit être modifié

1 faible, doit être amélioré

2 moyen, est acceptable comme tel, mais devrait être amélioré

3 adéquat, est correct sans amélioration

4 excellent, à conserver

5 sur performant, dépasse les exigences de la fonction

Échelle de valeur :

0 inapproprié 1 faible 2 moyen 3 adéquat 4 excellent 5 Sur performant

Éléments		Qualification	Défauts
		0 1 2 3 4 5	
Image vidéo de la scène	Globalement		
	Grandeur		
	Vitesse de rafraîchissement		
	Précision		
	Zoom		
	Stabilité lors de déplacements		
	Angle de vue		
Indicateurs d'états et de commandes	Globalement		
	Arrêt d'urgence		
	Joystick Rotation		
	Joystick Déplacement		
	Qualité de la disposition des icônes		

Carte des senseurs	Globalement		
	Position de la fenêtre		
	Dimension		
	Utilité		
	Précision		
Commandes	Globalement		
	Facilité à utiliser : Joystick		
	Facilité à utiliser : point de position		
	Facilité à utiliser : devant obstacles		
	Facilité à utiliser : carte des senseurs lors de déplacement		
	Facilité à reculer		
	Facilité à passer près d'objets		
	Facilité à passer une porte		
	Facilité à déplacer un obstacle		
	Vitesse d'exécution des commandes		
	Vitesse du robot		
	Niveau de sécurité		

Lien audio	Globalement		
	Qualité de l'écoute		
	Qualité de conversation		
	Facilité d'utilisation		
	Niveau de bruits		
Plateforme de téléopération			
	Facilité d'apprentissage		
	Facilité à opérer dans un domicile		
	Ergonomie de l'interface		
	Performance du robot		
	Maniabilité		
	Sécurité de la PFRT		

Quels sont les défauts à corriger, les manques à combler et les améliorations essentielles pour faciliter l'opération sécuritaire des PFRT ?

Autres commentaires :

ANNEXE B - Fonctionnalités de l'interface-opérateur

Des tests ont été réalisés pour valider les fonctionnalités du système. Cette annexe présente les résultats de tests qui ont porté sur des mécanismes de communication, de commande et de présentation des informations des senseurs entre le robot et l'interface-opérateur de téléopération.

Le tableau B.1 présente un groupe de mécanismes de base.

TABLEAU B.1 MÉCANISMES

Mécanismes	Résultats de leur fonctionnalité
Communication port CS	Connexion avec le serveur CS. Initialisation du temps de session, échange d'états et de commandes.
Communication port AV	Connexion avec le serveur vidéo. Mode VCI, envoi d'images de la caméra sur commande de l'interface-opérateur et leurs présentations à l'utilisateur.
Commande JSV direct	Déplacement du robot avec arrêt devant les obstacles. Le robot se déplace selon les valeurs de vitesses de translation et de rotation.
Commande JSV avec poussée	Mode poussée d'objet, le robot ne s'arrête pas devant un obstacle et peut entrer en contact avec lui.
Commande Volant	Rotation du robot et translation si une vitesse est pré-ajustée sur l'indicateur de vitesse.
Ajustement de vitesse	Ajuste la vitesse de translation du robot dans le mode volant. La valeur est indiquée par une barre d'arrêt sur l'indicateur de vitesse.
Commande GP	Points de chute et édition des points que le robot suit en séquence.
Commande départ	Permet aux diverses commandes de déplacement de se réaliser.
Commande pause	Arrête le robot momentanément.
Commande arrêt	Arrête le robot et efface la commande de déplacement en cours.
Indicateur de batterie	Présente le pourcentage d'énergie restante du robot.
Indicateur de vitesse	Présente la vitesse réelle du robot.
Indicateur session	Indique le temps de session depuis le branchement avec le serveur CS du robot.
Indicateur horloge	Indique l'heure réelle.
Indicateur autonomie	Indique le temps d'autonomie d'opération du robot avant une recharge des batteries.
Vue vidéo égocentrique VC	Présentation des images de la caméra du robot sur l'interface-opérateur.
Vue réalité augmentée RA	Présentation en arrière-plan d'une vue élargie de la scène. Les données de positionnement du robot permettent de positionner le modèle pour une fusion adéquate du modèle avec la vue vidéo réelle.
Vue mixte exocentrique ME	Présentation du modèle de la scène en 3D à partir d'une vue aérienne où le robot est au point central. Le robot est fixe et le modèle se positionne adéquatement selon les données de position reçues du robot. La vue vidéo est légèrement réduite et présentée dans le bas de la vue exocentrique.

Un mécanisme d'enregistrement (log) des variables de fonctionnement a aussi été implémenté et testé pour permettre de capter les données de temps, de distance et de nombre de commandes pour chaque essai qui seront faits avec des opérateurs. Un logiciel d'extraction (dialogR20061217a.exe) des informations du fichier de log a aussi été développé et utilisé séparément lors de l'analyse des données. Ce programme permet de générer six fichiers différents dans lesquels se trouvent des informations spécifiques dont la valeur du temps de l'interface-opérateur pour chaque évènement.

- logCMD.txt Contient les commandes autres que le joystick/volant
- logGP.txt Contient les commandes de points de position
- logGPedit.txt Contient les informations des GP en mémoire
- logMOVE.txt Contient les commandes de déplacement JS et volant
- logPHOTO.txt Contient les temps de prise de photos
- logPOS.txt Contient les lignes de positionnement retournées par le robot

Un second programme (NovicesPOS20070112a.m) sur le logiciel Matlab a été développé pour analyser les fichiers de métrique. Ce programme calcule les valeurs de métrique pour chaque tâche à partir des conditions de début et de fin de tâche.

Fenêtres de l'interface-opérateur

L'interface-opérateur développée a été conçue pour permettre de présenter les éléments principaux des interfaces conventionnelles de téléopération, c'est-à-dire une vue des images vidéo avec une carte de positionnement du robot en périphérie, d'une vue des senseurs du robot et d'un tableau de bord pour les commandes et états du robot. La figure B.1 présente le résultat de l'implémentation réalisée.



Figure B.1 Présentation conventionnelle de l'interface

L'interface se compose de fenêtres ou zones d'affichage spécifiques de dimensions pré-déterminées qui peuvent être allumées ou éteintes. Le fonctionnement de l'interface et de la communication avec le robot ne sont aucunement affectés par l'état des fenêtres. Le seul

impact est sur le temps de traitement du logiciel. L'opérateur peut en tout temps allumer ou éteindre n'importe laquelle de ces zones en pesant sur une touche dédiée du clavier. La liste suivante présente l'assignation des touches pour chacune des fonctionnalités.

- Images vidéo « V »
- Modèle 3D « M »
- Carte « C »
- Robot et senseurs « R »
- Tableau de bord « D »
- Information « I »

Les figures B.2 à B.4 présentent chacune des zones activées individuellement.

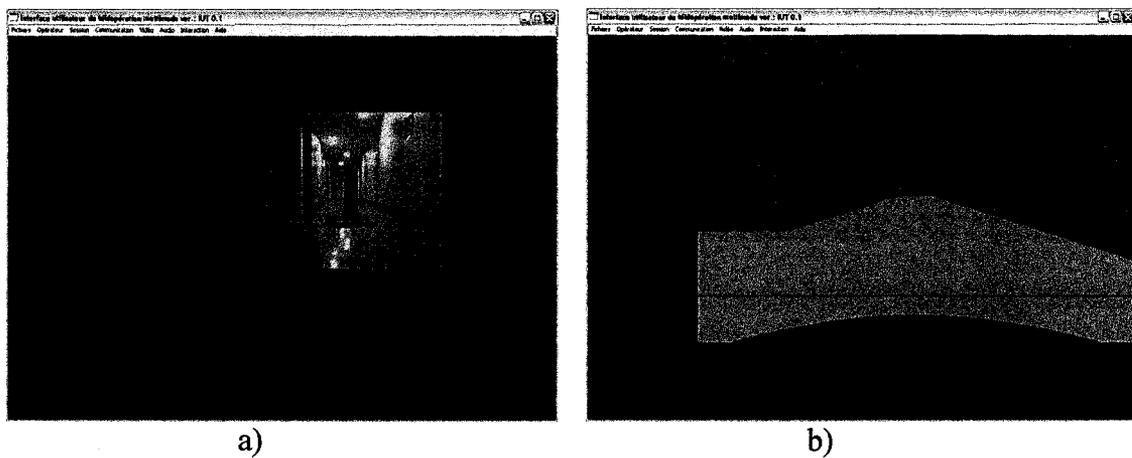


Figure B.2 Fenêtres : a) Vidéo et b) Modèle en réalité virtuelle

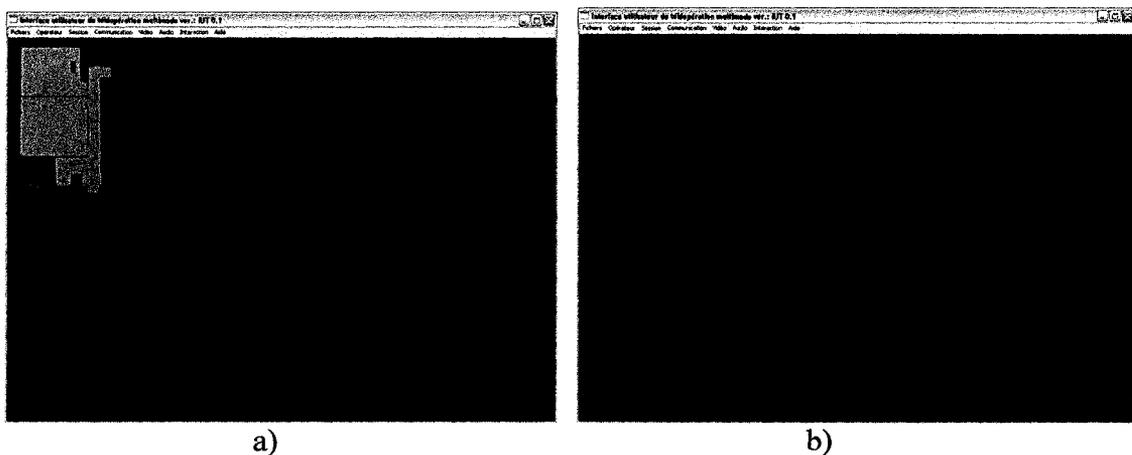


Figure B.3 Fenêtres : a) Carte et b) Robot et senseurs

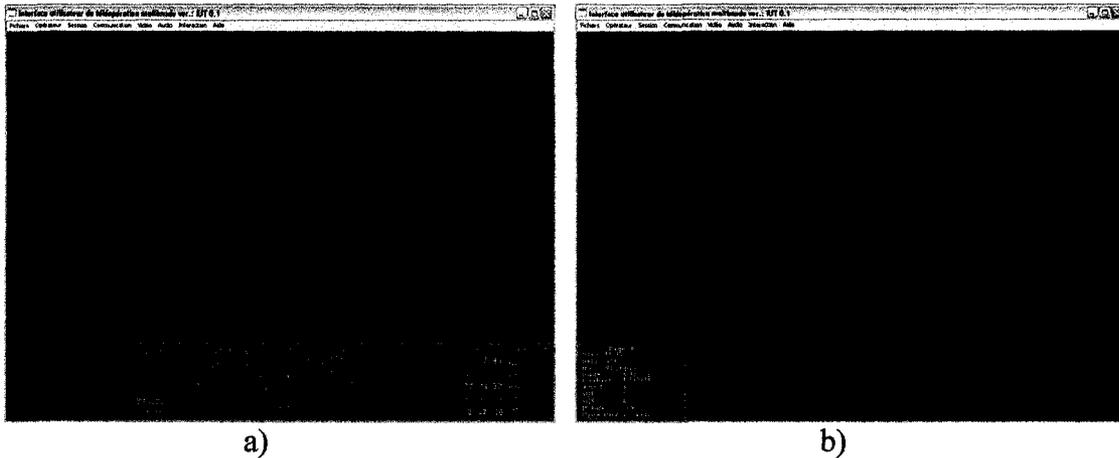


Figure B.4 Fenêtres : a) Tableau de bord et b) Zone d'information

8.1.1.1 Zone de la vue principale de visualisation de la scène

Cette zone présente la vue vidéo de la caméra avant lorsque la communication vidéo est activée avec le robot. Ce mécanisme n'est pas activé par défaut. Il faut peser sur la touche « V » pour démarrer le flot vidéo du robot. Il peut être en tout temps désactivé et réactivé en pesant successivement sur la touche « V » du clavier.

8.1.1.2 Zone de la carte

La carte est présentée de façon fixe et les coordonnées de position sont $x = 0, y = 0$ dans le coin inférieur gauche de cette zone. Elle montre aussi le robot dans sa position réelle dans la carte du plan des lieux ainsi que les trajets obtenus à partir des signaux des senseurs du robot. Cette zone est affichée par défaut et peut être en tout temps désactivée et réactivée en pesant successivement sur la touche « C » du clavier.

8.1.1.3 Zone robot

La vue du robot présente le robot en vue arrière ainsi que les trajets de ses senseurs selon la distance d'obstacles observés dans l'environnement immédiat du robot. Il est possible de changer l'angle de vue pour faire pivoter le robot selon un axe gauche-droit. Ceci permet de voir le dessous, l'arrière et le dessus du robot. La rotation de la roue de la souris ajuste cet angle si la souris est positionnée dans la zone de présentation du robot. Cette zone est affichée par défaut et peut être en tout temps désactivée et réactivée en pesant successivement sur la touche « R » du clavier.

8.1.1.4 Zone d'information

La zone d'information peut être utilisée pour la présentation d'information textuelle. Elle a servi essentiellement au débogage du code lors de sa conception. Cette zone est affichée par défaut et peut être en tout temps désactivée et réactivée en pesant successivement sur la touche « I » du clavier.

8.1.1.5 Zone du tableau de bord

Le tableau de bord comporte plusieurs sections et mécanismes de commandes et d'indications d'états. Cette zone est affichée par défaut et peut être en tout temps désactivée et réactivée en pesant successivement sur la touche « D » du clavier.

Modalités de visualisation

L'interface permet de sélectionner la modalité de présentation de l'information visuelle de la scène où évolue le robot. La figure B.5 présente une première modalité de visualisation de type conventionnel vidéo centrée comportant une vue vidéo de la scène en provenance des images captées de la caméra montée sur le robot (égocentrique), et au coin supérieur gauche une carte des lieux avec le positionnement du robot.



Figure B.5 Vue vidéo centrée conventionnelle

Les figures B.6 et B.7 présentent les deux situations où il y a ajout du modèle virtuel 3D. L'ajout du modèle 3D peut se faire selon deux perspectives, la première égocentrique et la seconde exocentrique. Ces vues peuvent être sélectionnées alternativement en tournant la roue de la souris vers l'avant ou l'arrière lorsque le modèle 3D est activé par la touche dédiée M.

La figure B.6 affiche dans la zone principale la vue en réalité augmentée où la zone vidéo est conservée au centre et superposée à une vue du modèle comportant un angle de vue supérieur à celle des images vidéo. Le modèle est adéquatement positionné en temps réel afin de correspondre aux composantes de la vue vidéo. La superposition se fait avec un taux de transparence des images vidéo de 80%.

La figure B.7 présente une vue mixte exocentrique où on retrouve la vue vidéo déplacée vers le bas et réduite de 40% en dimension et le modèle 3D en vue de perspective de façon exocentrique où l'observateur est situé au-dessus et en arrière du robot de façon à avoir une vue en plongée. Le robot est représenté dans le modèle comme référence au centre de la vue et le modèle se déplace et tourne selon la position réelle du robot. Cette particularité permet de référencer le robot avec la vue vidéo présentée dans le bas de la fenêtre. Les coordonnées de gauche et de droite ne sont jamais renversées entre le robot, le modèle et la vue vidéo de la scène.

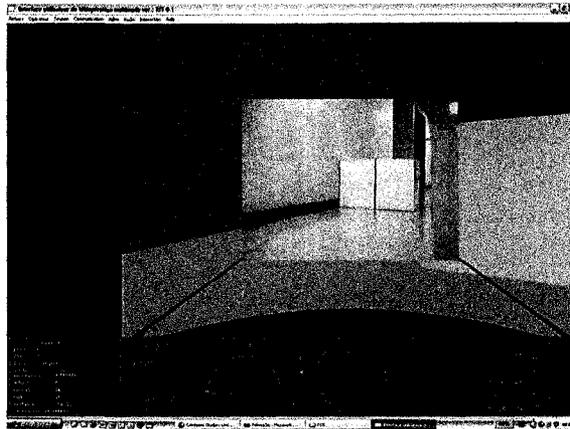


Figure B.6 Modalité en Réalité Augmentée

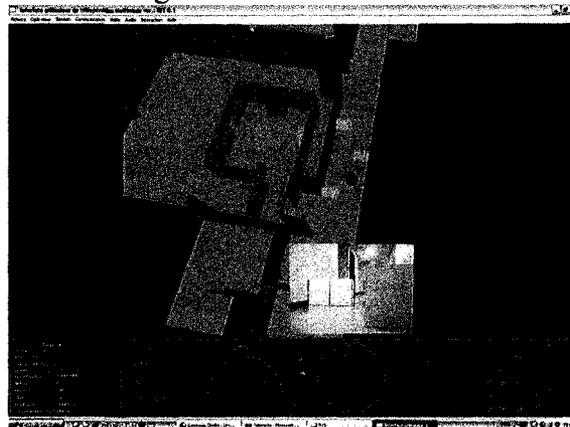


Figure B.7 Modalité Mixte Exocentrique

Indicateurs du tableau de bord

Le tableau de bord comporte dix zones distinctes pour présenter les informations d'états et de commandes à l'opérateur.

- Robot : La section la plus à gauche comprend une ligne de titre « ROBOT » sous la quelle se trouve une bande d'indication de la communication avec un robot distant. Lorsque la communication CS⁴ est établie avec un robot distant, le nom du robot apparaît dans cette zone ainsi qu'une petite antenne indiquant l'état actif de la communication. Une seconde bande comporte trois icônes de commande : la première est un triangle pointant vers la droite et servant à démarrer le robot « avance », la seconde servant à mettre le robot en pause et la troisième servant à l'arrêt d'urgence du robot. Le bouton Avance devient vert lorsqu'activé, le bouton Pause en jaune et clignotant et enfin l'Arrêt devient rouge. Enfin, sous le titre « OPÉRATEUR » se trouve une ligne où le nom de l'opérateur est affiché.
- Vitesse : La section à gauche de la section « ROBOT » est l'indicateur de vitesse. L'indicateur donne, grâce à une flèche rouge, la vitesse réelle du robot telle que

⁴ CS correspond au port de communication des commandes [LABONTÉ 2006b].

retournée par les messages d'états du robot qui sont communiqués plusieurs fois par seconde. Une seconde barre d'indication est aussi positionnée selon la vitesse désirée pour le mode de commande par volant. Lorsque la souris est dans la zone présente, il est possible d'ajuster la barre de vitesse à la valeur voulue. Elle demeure dans sa position tant que l'on ne modifie pas sa position.

- Mode : La section à droite de la section « Indicateur de vitesse » est la bande de mode de déplacement du robot. Elle comporte quatre boutons : celui du haut active le mode d'évitement d'obstacles, le second vers le bas désactive ce mode d'évitement et permet la poussé d'objet, le suivant vers le bas est pour un mode de déplacement avec le joystick par valeur relative de vitesse lorsque le robot se déplace vers une série de points de chute, et enfin le dernier bouton vers le bas qui active le mode autonome du robot, par exemple pour le retour autonome vers le point de charge. Le mode de poussé d'objet se désactive automatiquement lorsque le joystick virtuel est relâché. Cette particularité assure que l'opérateur doit le sélectionner intentionnellement à chaque fois qu'il active le joystick. Les fonctions des deux derniers boutons ne sont pas implémentées dans le prototype.
- Volant Virtuel/Joystick Virtuel : La section du joystick et du volant est dans la partie centrale du tableau de bord. On y retrouve deux anneaux concentriques dont la surface définie par le plus petit définit la zone d'activation du joystick. L'espace entre les deux anneaux est la zone d'activation du volant. Pour utiliser le joystick il faut utiliser le bouton gauche de la souris alors que l'on se trouve sur la zone joystick et le maintenir tant que l'on veut bouger le robot. Le point central passe alors au vert pour indiquer le choix du mode joystick. Le relâchement du bouton de souris annule immédiatement les vitesses de translation et de rotation envoyées au robot. Le mode joystick utilise les déplacements relatifs de la souris pour déterminer les vitesses de déplacements du robot (translation et rotation). Un déplacement vers le haut avance le robot, vers le bas le recule, un déplacement vers la gauche le fait tourner vers la gauche et un vers la droite le fait tourner à droite. Il faut noter que comme dans un véhicule automobile, lorsque l'on recule, la rotation du véhicule apparente se trouve à être inversée. L'interface-opérateur est configurée pour que le robot se comporte comme un véhicule automobile. Ce mode de commande comporte un indicateur de vitesse rudimentaire ainsi que de direction, sous la forme d'un triangle dans le centre du joystick qui peut atteindre le cercle extérieur pour la vitesse maximum. Il faut noter que cet indicateur donne la vitesse demandée par l'interface-opérateur, contrairement à celle reçue qui est affichée sur l'indicateur de vitesse. L'anneau extérieur est celui du volant et le point noir dans le haut en indique la position. Lorsque le volant est choisi par le bouton gauche de la souris, le robot se déplacera à la vitesse indiquée par la barre de l'indicateur de vitesse. Le point noir du volant se déplace selon la direction et passe en vert tant que l'on reste en mode volant. Ce mode se désactive automatiquement lorsque le bouton de souris est relâché. Lorsque le volant est actif l'opérateur peut ajuster la vitesse à partir de la roue de la souris tout en maintenant le volant actif.
- Photo : Bouton de prise de photo.
- Horloges : À droite du joystick et du volant se trouve une section d'horloges composée de trois indicateurs. Le premier est l'horloge de la session débutant

depuis la mise en communication avec le robot. Le second indique l'heure locale de l'ordinateur de l'interface-opérateur. Enfin, le troisième est le temps estimé de fonctionnement du robot avant un besoin de recharge de ses batteries.

- **Énergie** : Indique l'énergie disponible estimée des batteries avec une jauge graduée et comporte un indicateur de seuil critique nécessitant une recharge avec un pointeur rouge.



Figure B.8 Tableau de bord.



Figure B.9 Mode joystick, direction avant à vitesse maximum.



Figure B.10 Mode volant, direction avant selon position de la barre de vitesse et volant.

Connexion avec le serveur du Télérobot

Lorsque l'opérateur demande une connexion avec le serveur du robot, il doit activer en premier celle du port de commande et d'états (CS command and status). Lorsque la connexion s'établit, l'indicateur de communication et le compteur de temps de session se réinitialisent et l'indicateur de batterie du robot se met à jour. L'opérateur peut alors activer la connexion vidéo en sélectionnant la commande « Communication avec le port AV principal ». Lorsque la touche V est pesée, les images vidéo de la caméra principale sont alors affichées au centre de l'interface-opérateur. Les fichiers de log suivants présentent les détails de ce processus.

Résultat du log « \20060704\LogTele\logMessTUIa1.txt » et
« \20060725\logMessTUI_F14b.txt »

Synchronisation de départ sur le portCS principal

Le processus de synchronisation des horloges de l'interface-opérateur et du robot utilise les messages suivants :

Message de départ de l'interface-opérateur

Départ « *IMS name 0 0 »

Commande « time : TI ... »
 Commande « robot on : RO 1 »
 Commande « emergency stop off : ES 0 »
 Commande « stop robot resume : SR 0 »
 Commande « overcharge reset override : OC 0 »
 Message END
 Message de départ du robot
 Réponse du robot « *RMM name 0 0 »
 Message temps robot « TS ... »
 Message END

Le log suivant montre l'ajustement du temps TUI de l'interface-opérateur après réception du message de départ du robot.

Résultat du log « \20060704aLogTele\logMessTUIa1.txt »

```

STime 25853
STime 25863
FDWRITEPORTCS
STime 0
*IMS Interface 0 0 ;
TI 2006 7 2 4 14 50 30 883 ;
RO 1 ;
ES 0 ;
SR 0 ;
OC 1 ;
END 0 ;
STime 0
STime 10
STime 20
STime 30
FDREADPORTCS
ROBOT-->
*RMM robot1 0 0 ;
TS 2006 7 2 4 14 45 52 990 ;
END 0 ;
<--ROBOT
STime 0
STime 10
  
```

Message de déplacement du robot (RMM)

Après une connexion de l'interface-opérateur avec le serveur du robot, ce dernier envoie périodiquement et approximativement aux 200 millisecondes un message comportant des informations de positionnement et de valeurs de senseurs. Ces messages du robot comportent les informations suivantes :

Réponse du robot « *RMM name seqnb sestime0 »
 Message temps robot « TS ... »
 Message de position « POS ... »
 Message d'état des infrarouges « IR ... »
 Message d'état des ultrasons « US ... »
 Message d'état des pare-chocs « BP ... »
 Message END

Exemple de log de ce type de message :

Résultat du log « \20060704aLogTele\logMessTUIa1.txt »

```
STime 170
FDREADPORTCS
ROBOT-->
*RMM robot1 1 100 ;
TS 2006 7 2 4 14 45 53 90 ;
POS 0 0 5975 13652 0 0 ;
IR 16 134 65535 65535 65535 182 65535 290 134 132 255 65535 187 65535 65535 255 131 ;
US 4 330 280 280 470 ;
BP 6 1 1 1 1 1 1 ;
END 1 ;
<--ROBOT
STime 180
```

...

```
STime 370
*IMS Interface 1 370 ;
TI 2006 7 2 4 14 50 31 293 ;
END 1 ;
FDREADPORTCS
ROBOT-->
*RMM robot1 2 302 ;
TS 2006 7 2 4 14 45 53 292 ;
POS 0 0 5975 13652 0 0 ;
IR 16 132 65535 65535 65535 195 65535 227 133 133 65535 65535 184 65535 65535 266 130 ;
US 4 330 300 300 470 ;
BP 6 1 1 1 1 1 1 ;
END 2 ;
<--ROBOT
STime 380
```

Message d'états du robot (RGM)

Le robot envoie aussi un message d'états sur son horloge, ses états de fonctionnement et sur ses batteries, approximativement aux secondes.

Réponse du robot « *RGM name seqnb sestime0 »

Message d'états « ST ... »

Message de puissance « PW ... »

Message END

Résultat du log « \20060704aLogTele\logMessTUIa1.txt »

```
STime 2375
*IMS Interface 3 2375 ;
TI 2006 7 2 4 14 50 34 298 ;
END 3 ;
FDREADPORTCS
ROBOT-->
*RGM robot1 20 3331 ;
ST 8 0 3 0 0 0 0 0 0 ;
PW 1 55 66 26399 -1 ;
END 20 ;
*RMM robot1 21 3331 ;
TS 2006 7 2 4 14 45 56 321 ;
POS 0 0 5975 13652 0 0 ;
IR 16 137 65535 65535 65535 183 65535 219 135 137 345 65535 190 65535 65535 278 130 ;
US 4 340 370 420 470 ;
BP 6 1 1 1 1 1 1 ;
END 21 ;
<--ROBOT
STime 2385
STime 2405
```

Cycle des messages du robot (RGM et RMM)

Le log suivant présente les résultats de la transmission de message RGM et RMM par le robot (logMessTUI_F15.txt)

«\20060721\logMessTUI_F15.txt »

```
STime 78714
FDREADPORTCS
ROBOT-->
*RGM robot1 495 79763 ;
ST 8 0 3 0 0 0 0 3 0 ;
PW 1 55 66 23899 -1 ;
END 495 ;
*RMM robot1 496 79763 ;
TS 2006 7 5 21 11 49 45 132 ;
POS 220 0 6515 13594 0 357000 ;
IR 16 138 346 40 247 170 161 65535 134 136 65535 65535 190 65535 65535 65535 125 ;
US 4 300 280 260 280 ;
BP 6 1 1 1 1 1 1 ;
END 496 ;
<--ROBOT
STime 78724
STime 78744
STime 78754
STime 78764
STime 78774
STime 78784
*IMS Interface 134 78784 ;
MVD 1 500 0 ;
END 134 ;
STime 78794
STime 78804
STime 78814
FDREADPORTCS
ROBOT-->
*RMM robot1 497 79864 ;
TS 2006 7 5 21 11 49 45 232 ;
POS 220 0 6535 13593 0 357000 ;
IR 16 138 346 40 247 170 161 65535 134 136 65535 65535 190 65535 65535 65535 125 ;
US 4 280 260 240 300 ;
BP 6 1 1 1 1 1 1 ;
END 497 ;
<--ROBOT
STime 78834
###      yawRecv= -357
STime 78844
STime 78864
STime 78864
STime 78874
STime 78884
STime 78904
STime 78914
STime 78924
STime 78934
STime 78945
STime 78955
STime 78965
STime 78975
*IMS Interface 135 78975 ;
MVD 1 500 0 ;
END 135 ;
STime 78995
STime 79005
STime 79015
STime 79025
FDREADPORTCS
ROBOT-->
```

```
*RMM robot1 498 80066 ;
TS 2006 7 5 21 11 49 45 434 ;
POS 270 -1000 6586 13590 0 357000 ;
IR 16 135 300 250 205 167 206 65535 136 136 65535 65535 187 65535 65535 65535 133 ;
US 4 240 210 200 220 ;
BP 6 1 1 1 1 1 1 ;
END 498 ;
<--ROBOT
```

...

```
STime 79826
FDREADPORTCS
ROBOT-->
*RGM robot1 502 80871 ;
ST 8 0 3 0 0 0 3 0 ;
PW 1 55 66 23899 -1 ;
END 502 ;
*RMM robot1 503 80871 ;
TS 2006 7 5 21 11 49 46 240 ;
POS 75 0 6743 13582 0 357000 ;
IR 16 130 126 47 170 48 57 65535 137 136 65535 65535 176 65535 65535 65535 132 ;
US 4 100 60 80 130 ;
BP 6 1 1 1 1 1 1 ;
END 503 ;
<--ROBOT
STime 79836
```

Le robot envoie un message RGM et un RMM au même cycle

Le message suivant est un RMM à environ : $79864 - 79763 = 101$ msec

Par la suite les RMM sont transmis aux : $80066 - 79864 = 202$ msec

Les RGM sont transmis aux : $80871 - 79763 = 1108$ sec

Message d'activation du robot (PLAY, PAUSE, STOP)

L'interface-opérateur envoie selon les commandes de l'opérateur des informations d'arrêt, de départ et de mise en pause du robot.

Message « *IMS name seqnb sestime0 »

Commande « emergency stop off : ES 0 »

Commande « override recharge : OC 1 »

Commande « stop robot resume : SR 0 »

Message END

Résultat du log « \20060710LogFonc\logMessTUI_F07_1.txt »

```
STime 29913
FDREADPORTAV
GOon
*IMS Interface 47 29933 ;
ES 0 ;
OC 1 ;
SR 0 ;
END 47 ;
FDREADPORTAV
STime 29933
```

Pause du robot

Message « *IMS name seqnb sestime0 »

Commande « override recharge : OC 1 »

```

*RMM robot1 498 80066 ;
TS 2006 7 5 21 11 49 45 434 ;
POS 270 -1000 6586 13590 0 357000 ;
IR 16 135 300 250 205 167 206 65535 136 136 65535 65535 187 65535 65535 65535 133 ;
US 4 240 210 200 220 ;
BP 6 1 1 1 1 1 1 ;
END 498 ;
<--ROBOT

```

...

```

STime 79826
FDREADPORTCS
ROBOT-->
*RGM robot1 502 80871 ;
ST 8 0 3 0 0 0 3 0 ;
PW 1 55 66 23899 -1 ;
END 502 ;
*RMM robot1 503 80871 ;
TS 2006 7 5 21 11 49 46 240 ;
POS 75 0 6743 13582 0 357000 ;
IR 16 130 126 47 170 48 57 65535 137 136 65535 65535 176 65535 65535 65535 132 ;
US 4 100 60 80 130 ;
BP 6 1 1 1 1 1 1 ;
END 503 ;
<--ROBOT
STime 79836

```

Le robot envoie un message RGM et un RMM au même cycle

Le message suivant est un RMM à environ : $79864 - 79763 = 101$ msec

Par la suite les RMM sont transmis aux : $80066 - 79864 = 202$ msec

Les RGM sont transmis aux : $80871 - 79763 = 1108$ sec

Message d'activation du robot (PLAY, PAUSE, STOP)

L'interface-opérateur envoie selon les commandes de l'opérateur des informations d'arrêt, de départ et de mise en pause du robot.

Message « *IMS name seqnb sestime0 »

Commande « emergency stop off : ES 0 »

Commande « override recharge : OC 1 »

Commande « stop robot resume : SR 0 »

Message END

Résultat du log « \20060710LogFonc\logMessTUI_F07_1.txt »

```

STime 29913
FDREADPORTAV
GOon
*IMS Interface 47 29933 ;
ES 0 ;
OC 1 ;
SR 0 ;
END 47 ;
FDREADPORTAV
STime 29933

```

Pause du robot

Message « *IMS name seqnb sestime0 »

Commande « override recharge : OC 1 »

Commande « pause robot : SR 1 »
Message END

Résultat du log « \20060710LogFonc\logMessTUI_F07_1.txt »

*STime 27830
VCIMESSAGESENDED
STime 27871
PAUSEon
*IMS Interface 44 27881 ;
OC 1 ;
SR 1 ;
END 44 ;
STime 27881
FDREADPORTAV
STime 27891
FDREADPORTAV
STime 27901
IMAGEONSCREEN
STime 27911*

Arrêt d'urgence du robot

Message « *IMS name seqnb sestime0 »
Commande « emergency stop off : ES 1 »
Message END

Commande de volant

L'ajustement de vitesse se fait avec la roue de la souris lorsqu'elle est positionnée dans la zone du joystick ou de l'indicateur de vitesse. Dans ce mode, l'interface-opérateur envoie des commandes de déplacement régulièrement au robot (approximativement aux 200 millisecondes).

Message « *IMS name seqnb sestime0 »

Message de mouvement « MVD 1 vt vr »
et Message de volant relâché « MVD 0 vt vr »
Message END

Résultat du log « \20060710LogFonc\logMessTUI_F01.txt »

*STime 50474
STime 50494
VCIMESSAGESENDED
STime 50504
FDREADPORTAV
STime 50514
FDREADPORTAV
STime 50524
*IMS Interface 106 50524 ;
MVD 1 0 28000 ;
END 106 ;
IMAGEONSCREEN
STime 50534
STime 50544
STime 50554
STime 50574
STime 50584
STime 50594
VCIMESSAGESENDED*

```

STime 50604
FDREADPORTAV
STime 50614
FDREADPORTAV
FDREADPORTCS
ROBOT-->
*RMM robot1 319 51618 ;
TS 2006 7 1 10 10 44 59 994 ;
POS 0 -27000 6976 13653 0 2000 ;
IR 16 126 65535 65535 65535 166 65535 65535 136 135 65535 65535 180 65535 65535 65535 134 ;
US 4 750 750 780 820 ;
BP 6 1 1 1 1 1 ;
END 319 ;
<--ROBOT
STime 50624
IMAGEONSCREEN
STime 50644
STime 50654
STime 50664
STime 50674
STime 50684
STime 50694
VCIMESSAGESENDED
STime 50714
FDREADPORTAV
STime 50724
*IMS Interface 107 50724 ;
MVD 0 0 28000 ;
END 107 ;
JSoff
DWoff
FDREADPORTAV
STime 50734

```

Commande du joystick en mode évitement

Lorsque l'opérateur sélectionne le joystick, l'interface-opérateur envoie les commandes de déplacement selon la position du pointeur de souris dans la zone du joystick. Ces messages sont répétés approximativement aux 200 millisecondes tant que le bouton de souris est maintenu par l'opérateur. Le relâchement du bouton envoie une commande d'arrêt au robot.

```

Message « *IMS name seqnb sestime0 »
Message de joystick « MVD 1 vt vr»
et Message de joystick relâché « MVD 0 vt vr»
Message END

```

Résultat du log « \20060710LogFonc\logMessTUI_F03.txt »

```

STime 82749
VCIMESSAGESENDED
JSon
STime 82759
*IMS Interface 197 82759 ;
MVD 1 50 0 ;
END 197 ;
FDREADPORTAV
STime 82779
FDREADPORTAV
STime 82789
IMAGEONSCREEN
STime 82809

```

...

```
STime 83771
STime 83781
STime 83791
*IMS Interface 203 83791 ;
MVD 1 420 -2800 ;
END 203 ;
VCIMESSAGESENDED
STime 83811
FDREADPORTAV
FDREADPORTAV
```

...

```
STime 85193
IMAGEONSCREEN
STime 85203
*IMS Interface 212 85203 ;
MVD 0 500 -12320 ;
END 212 ;
JSoff
DWoff
STime 85223
STime 85233
STime 85243
```

Commande du joystick en mode poussée

Ce mode est activé par le bouton de poussée et n'est fonctionnel que pour une séquence ininterrompue d'utilisation du joystick. Lorsque le joystick est pesé et maintenu, l'évitement d'obstacle à l'avant du robot est suspendu tant que le joystick est maintenu par l'opérateur avec le bouton gauche de la souris. Aussitôt que le joystick est relâché, le mode est désactivé. Le log suivant présente les résultats de la transmission des commandes de l'interface-opérateur (logMessTUI_F15.txt) « \20060721\logMessTUI_F15.txt »

```
JSon
STime 75149
*IMS Interface 113 75149 ;
MVD 1 0 0 ;
END 113 ;
FDREADPORTAV
STime 75159
```

Départ du JSV en mode avoid

...

```
FDREADPORTCS
ROBOT-->
*RGM robot1 488 78634 ;
ST 8 0 3 0 0 0 0 3 0 ;
PW 1 55 66 23899 -1 ;
END 488 ;
*RMM robot1 489 78634 ;
TS 2006 7 5 21 11 49 44 3 ;
POS 254 0 6231 13609 0 357000 ; Vitesse maximum du robot 254
IR 16 131 171 65535 290 181 207 65535 134 139 65535 65535 191 65535 65535 65535 130 ;
US 4 560 530 510 530 ;
BP 6 1 1 1 1 1 1 ;
END 489 ;
<--ROBOT
STime 77613
IMAGEONSCREEN
STime 77623
```

...

```

STime 75950
*IMS Interface 117 75950 ;
MVD 1 500 0 ;
END 117 ;
FDREADPORTAV
STime 75960
FDREADPORTAV
STime 75970
IMAGEONSCREEN
STime 75980
STime 76000
STime 76010
STime 76020
STime 76030
STime 76040
VCIMESSAGESENDED
STime 76050
*IMS Interface 118 76050 ;
TI 2006 7 5 21 11 54 24 948 ;
END 118 ;
FDREADPORTAV
STime 76060
FDREADPORTAV
FDREADPORTCS
ROBOT-->
*RMM robot1 479 77102 ;
TS 2006 7 5 21 11 49 42 471 ;
POS 0 0 5973 13622 0 358000 ;
IR 16 135 65535 65535 65535 178 65535 65535 134 140 65535 65535 190 65535 65535 280 132 ;
US 4 510 620 660 770 ;
BP 6 1 1 1 1 1 1 ;
END 479 ;
<--ROBOT
STime 76070

...

STime 83050
*IMS Interface 150 83050 ;
MPH 1 155 0 ;
END 150 ;
STime 83060
STime 83070
*IMS Interface 151 83070 ;
TI 2006 7 5 21 11 54 31 968 ;
END 151 ;
VCIMESSAGESENDED
STime 83080
FDREADPORTAV
STime 83090
FDREADPORTAV
STime 83100
IMAGEONSCREEN
STime 83110
STime 83131
STime 83141
STime 83151
STime 83161
STime 83171
VCIMESSAGESENDED
FDREADPORTAV
STime 83181
IMAGEONSCREEN
FDREADPORTCS
ROBOT-->
*RGM robot1 523 84227 ;
ST 8 0 3 0 0 0 0 3 0 ;
PW 1 55 66 23799 -1 ;
END 523 ;

```

Commande du JSV à vitesse max

Robot à l'arrêt devant l'obstacle

Mode poussée

```

*RMM robot1 524 84227 ;
TS 2006 7 5 21 11 49 49 596 ;
POS 19 -1000 6754 13581 0 357000 ;      Robot pousse l'obstacle
IR 16 132 0 50 320 60 30 65535 134 136 65535 65535 183 65535 65535 129 ;
US 4 60 60 60 110 ;
BP 6 1 1 1 1 1 1 ;
END 524 ;
<--ROBOT
STime 83211

```

...

```

STime 88208
*IMS Interface 166 88208 ;
MVD 1 275 0 ;                          Mode avec évitement et vitesse max.
END 166 ;
IMAGEONSCREEN
STime 88218
STime 88228
STime 88238
STime 88258
STime 88268
STime 88278
STime 88288
VCIMESSAGESENDED
STime 88298
FDREADPORTAV
STime 88308
IMAGEONSCREEN
FDREADPORTCS
ROBOT-->
*RMM robot1 555 89344 ;
TS 2006 7 5 21 11 49 54 712 ;
POS 0 0 7006 13566 0 357000 ;          Robot demeure immobile
IR 16 131 0 58 314 57 30 65535 137 141 65535 65535 186 65535 65535 128 ;
US 4 60 60 60 80 ;
BP 6 1 1 1 1 1 1 ;
END 555 ;
<--ROBOT
STime 88318
###      yawRecv= -357
STime 88338
STime 88348

```

Commande par point de chute

Ce mécanisme permet de positionner des points de chute que le robot devra parcourir dans l'ordre des points spécifiés dans l'interface-opérateur. Ces points peuvent être spécifiés par l'opérateur en positionnant la souris et en cliquant sur le bouton gauche. La position de la souris peut être dans la zone de la carte, dans la partie basse des images vidéo (sous la ligne d'horizon) ou dans le modèle en vue égo ou exocentrique. Chaque point comporte un anneau de couleur différente à la base de sa tige. L'opérateur peut faire disparaître un point en cliquant dans l'anneau du point. Le robot se déplace aussitôt vers le point de chute s'il est actif (bouton Avance pesé).

Si l'opérateur enlève le premier point donné au robot, ce point disparaîtra (l'interface-opérateur envoie un stop et reset le tampon SR=2). S'il y a d'autres points, alors le suivant prend la place du premier (le TUI envoie un SR=2 et un GP avec les nouvelles coordonnées). Ces commandes ne sont pas instantanées mais sont exécutées au cycle de la prochaine seconde de l'horloge de l'interface-opérateur.



Figure B.11 Trajet de points

Les points de chute sont possibles dans les multiples vues: carte, vidéo et modèle virtuel 3D. La séquence des points de chute est gérée par l'interface-opérateur. Un seul point est envoyé à la fois au robot. Lorsque le robot atteint un point, l'interface-opérateur efface le point et envoie le suivant jusqu'à la fin de la liste de points. Pour chaque point l'interface-opérateur envoie trois messages qui sont les suivants :

Message « *IMS name seqnb sestime0 »

Message de point « GP...»

Message END

Résultat du log « \20060710LogFonc\logMessTUI_F06_3.txt » un premier GP

```

STime 26238
VCIMESSAGESENDED
GPtoGoOn
GPedit 1
7742 379 -10523 -278000
STime 26248
*IMS Interface 39 26248 ;
GP 7742 10523 379 278000 ;
END 39 ;
FDREADPORTAV
STime 26258
FDREADPORTAV

...

STime 38806
GPtoGoOff
VCIMESSAGESENDED
STime 38866
STime 38866
FDREADPORTAV
STime 38876
FDREADPORTAV
STime 38886

```

Anomalies notées

Certaines anomalies ont été notées mais n'affectent pas le déroulement des tests de comparaison des modalités de visualisation.

Messages du robot

Problème avec un bloc de messages reçus dans un même bloc TCP au moment où l'on demande d'afficher l'image vidéo à l'écran de l'interface-opérateur. Le temps de chargement de la première image dans OpenGL semble freiner les cycles du processus « sessionloop », ce qui décale la lecture des messages dans la pile de TCP. Voir le log logMessTUI_F14b.txt du 20060725.

Le robot envoie des messages de RGM et un de RMM avec le même temps de session, il envoie ensuite un message RMM 100 ms plus tard et par la suite cinq RMM aux 200 ms. Le premier message RMM après 100 ms n'était pas prévu initialement. Ce cycle est exécuté continuellement et prend donc 1100 ms. Dans certaines circonstances, lorsque le TUI envoie un message de TI avec un temps de session égale à 0, le robot réinitialise son temps de session à 0, mais envoie dans le même paquet TCP deux messages de RMM avec le temps de session à 0 pour le premier et 100 ms pour le second (réf. : logMessTUI_test3.txt du 20060811).

Points de chute

Le mode d'évitement d'obstacles utilisé crée des problèmes avec l'usage des points de chute GP (Go Point). Ce mode est celui dit sécuritaire. Ce mode consiste à arrêter le robot devant un obstacle se situant devant le robot. Dans ce mode, des obstacles sur les côtés ralentissent le robot s'ils sont trop près. Si l'on définit un point de chute de l'autre côté d'un obstacle par rapport au robot, ce dernier ne pourra l'atteindre.

Parfois, le robot continue à vouloir atteindre un point de chute même s'il a été effacé par l'interface-opérateur. Le robot semble ignorer la commande de désactivation du mode de point de chute.

Parfois le mode poussée demeure en action même si l'on active et désactive le mode. Une condition qui semble déclencher cette condition est lorsque le robot tourne et que le pare choc est activé.

Il arrive au démarrage du robot que ce mode de poussée soit actif.

Une façon d'éteindre ce mode est d'éteindre les logiciels du robot ./stopTelerobot.sh et les réactiver ./startTelerobot.sh

Le robot ne retourne pas l'information de son mode de point de chute.

Un délai de 200 à 400 ms est requis par le robot pour traiter les informations reçues de l'interface-opérateur et pour réaliser les commandes.

ANNEXE C - Résultats des tests de performance système

Les données de performance du système pour chaque fonctionnalité ont été déterminées selon trois catégories :

- Communication
 - Taux de transfert d'images vidéo
 - Taux de transfert de messages de position
 - Variation du taux de transmission des messages de position
 - Taux de transfert des messages de commande
- Présentations visuelles
 - Présentations visuelles de l'interface-opérateur
 - Correspondance visuelle entre le modèle 3D et les images vidéo
 - Précision de l'extrapolation de position
- Précision de positionnement
 - Distance d'arrêt du robot
 - Rotation lors de translation
 - Erreur de positionnement lors de rotation du robot
 - Précision de positionnement dans les parcours de tests

Communication

Le robot communique par réseau Wi-Fi sans fil avec un routeur de type Linksys de type (802.11b de 10 mbps). Ce routeur est branché au réseau sans fil du laboratoire. Le logiciel de l'interface-opérateur roule sur un ordinateur branché directement par câble Ethernet à 100 mbps au réseau du laboratoire.

La synchronisation entre l'horloge de temps de session de l'interface-opérateur et celle du robot se fait en deux étapes. Après une commande de connexion sur le port de commande *portCS* (commandes et états), l'interface-opérateur envoie un message de temps *TI* (*Time of the Interface*) avec la séquence 0 et le temps de session à 0. Le robot, sur réception de ce message, met son horloge à 0 et envoie un message de type *RMM* (*Robot Movement messages*) avec un message de type ajustement de temps *ST* (*Set Time*) à 0. Lorsque l'interface-opérateur reçoit ce message, il mémorise le délai de réponse du robot et remet son temps de session à 0. Si tout se passe dans l'ordre, les deux horloges sont synchronisées. Dans certains cas toutefois, un délai s'introduit entre les deux horloges. Un deuxième processus de synchronisation a lieu au moment où l'interface-opérateur active le port vidéo *portAV* (audio et vidéo). Le premier message du robot reçu après cette connexion sert à mettre à jour le temps de session de l'interface-opérateur. Il faut noter qu'à cause de la nature non synchrone de Windows entre le traitement des messages TCP et avec la boucle de traitement principale de l'interface-opérateur, des décalages d'environ 20 ms sont introduits entre le temps de l'interface-opérateur et celui des messages reçus, en plus de ceux des délais de communication et ceux du robot lui-même entre le temps de l'évènement et celui de l'envoi du message.

Transmission des images vidéos

Un test en continu sur le réseau du laboratoire minimum de 10 fps avec des images couleurs de 320 par 240 pixels a été fait. Le calcul du temps disponible durant ce test a donné un taux maximum de 33 fps.

Test de taux de transmission des images vidéo

Le log suivant présente les résultats du test de taux de transmission des images vidéos «\20060710LogFonc\logMessTUI_F01.txt ».

Le taux d'images demandées par l'interface-opérateur est de 10 fps à 320x240 pixels.

```
LogStart 10/7 h10h48:49.284
STime 0
STime 19059
STime 19069
STime 19079
STime 19099
STime 19109
VCIMESSAGESENDED
STime 19119
FDREADPORTAV
STime 19129
FDREADPORTAV
STime 19139
IMAGEONSCREEN
STime 19149
STime 19169
STime 19179
STime 19189
STime 19199
STime 19209
VCIMESSAGESENDED
STime 19219
FDREADPORTAV
STime 19239
FDREADPORTAV
FDREADPORTCS
ROBOT-->
*RGM robot1 125 20234 ;
ST 8 0 3 0 0 0 0 3 0 ;
PW 1 55 66 23899 -1 ;
END 125 ;
*RMM robot1 126 20234 ;
TS 2006 7 1 10 10 44 28 610 ;
POS 0 0 6975 13652 0 0 ;
IR 16 130 65535 65535 65535 178 65535 389 135 136 65535 65535 174 251 255 245 131 ;
US 4 750 750 780 810 ;
BP 6 1 1 1 1 1 1 ;
END 126 ;
<--ROBOT
FDREADPORTAV
STime 19249
FDREADPORTAV
STime 19259
IMAGEONSCREEN
STime 19269
STime 19279
STime 19289
STime 19309
STime 19319
VCIMESSAGESENDED
STime 19329
FDREADPORTAV
STime 19339
FDREADPORTAV
STime 19349
FDREADPORTAV
STime 19359
IMAGEONSCREEN
FDREADPORTCS
ROBOT-->
*RMM robot1 127 20340 ;
TS 2006 7 1 10 10 44 28 716 ;
POS 0 0 6975 13652 0 0 ;
```

```
IR 16 133 65535 65535 65535 177 65535 386 136 136 65535 65535 177 173 227 65535 131 ;
US 4 750 750 780 830 ;
BP 6 1 1 1 1 1 1 ;
END 127 ;
<--ROBOT
STime 19369
STime 19399
STime 19399
STime 19419
STime 19429
VCIMESSAGESENDED
```

Calcul du délai de communication entre le moment où une requête d'image est envoyée « VCIMESSAGESENDED » et quand l'image est affichée sur l'interface-opérateur « IMAGEONSCREEN » :

$19139 - 19109 = 30$ millisecondes, ce qui permet d'avoir un taux maximum de 33 fps.

Les requêtes d'images sont faites aux :

$19209 - 19109 = 100$ millisecondes ce qui confirme le taux de 10 fps demandées lors des essais.

Délai de transmission des messages de positionnement du robot

Les fichiers de log de l'interface-opérateur comportent des informations sur le temps de session de l'interface-opérateur et des informations sur les messages envoyés et reçus du robot. À chaque cycle typiquement de 20 ms, l'engin principal de l'interface-opérateur réalise une régénération des différentes vues et du modèle 3D. Au début de chaque cycle, un message de la valeur du temps de session de l'interface-opérateur est écrit dans le log. Lorsqu'un message est reçu par le port TCP, il est automatiquement transféré dans le tampon de l'interface-opérateur de message reçu et inscrit dans le fichier de log. Il peut donc y avoir des variations entre les valeurs du temps de session qui est toujours le temps au début d'un cycle et la valeur du temps du robot. Ce message peut être inscrit avant ou après le début d'un cycle de session. En plus, il peut survenir des délais causés par les processus internes du robot lors de la préparation de son message ou lors de sa transmission par TCP/IP sur le réseau.

Nous avons donc mesuré ces variations sur trois tests avec lesquels nous avons compilé dix valeurs successives. Les dix valeurs sont celles des temps de l'interface et du robot juste après la synchro de l'interface-opérateur avec le temps du robot (juste après la commande d'écriture sur le *portAV*). Les variations de délais observées entre le temps de l'interface-opérateur et la valeur de positionnement est de 89 ms en moyenne et avec un écart-type de 16 ms. Les décalages sont causés par :

- a) Le temps de l'interface-opérateur est au début d'un cycle, et la réception du message est indépendante de ce cycle et dépend du traitement de Windows. Un cycle du TUI prend au moins 10 ms et en moyenne 20 ms. Un délai de 0 à 20 ms est introduit entre le temps de l'interface-opérateur et temps du robot dans le log.
- b) Le robot introduit un délai entre le moment de préparation du message et son envoi sur TCP.
- c) Le réseau introduit un délai de communication.

Test de délais de transmission des messages de positionnement

Tableau C.1 Valeurs des trois tests du dossier 20060811 (fichier : Analyse20060811.xls)

Temps de la session TUI	Variation du temps Interface-opérateur	Temps du robot RMM	Variation du temps robot	Différence	Max	Min	Variation	
Test 1								
1833		1833		0				
2023	190	2037	204	14				
2233	210	2241	204	8				
2403	170	2344	103	-59				Voir note 2
2604	201	2550	206	-54				
2774	170	2756	206	-18				
2944	170	2958	202	14				
3144	200	3159	201	15				
3355	211	3362	203	7				
3505	150	3463	101	-42				
Test 2					15	-59	74	Valeur minimum
1883		2037		154				
2093	210	2243	206	150				
2294	201	2448	205	154				
2494	200	2649	201	155				
2694	200	2750	101	56				Voir note 2
2794	100	2952	202	158				
2995	201	3154	202	159				
3195	200	3356	202	161				
3405	210	3563	207	158				
3605	200	3767	204	162				Voir note 2
Test 3					162	56	106	Valeur maximum
1883		2017		134				
2083	200	2218	201	135				
2193	110	2319	101	126				Voir note 2
2394	201	2521	202	127				
2604	210	2724	203	120				
2814	210	2933	209	119				
3014	200	3138	205	124				
3205	191	3340	202	135				
3385	180	3441	101	56				voir note 2
3595	210	3643	202	48				
					135	48	87	
								La variation de délai entre le temps du TUI et la valeur des messages de positionnement
								89 ms
								16,1 ms
								Écart type

Délai de commande joystick et volant

L'interface-opérateur transmet les commandes de l'opérateur au prochain cycle de rafraîchissement de l'interface-opérateur. L'interface-opérateur retransmet les commandes du volant et du joystick régulièrement tant que les boutons ne sont pas relâchés par l'opérateur. Le délai de retransmission des commandes du volant et du joystick (commande de déplacement *MVD*) mesuré est de : $18308 - 18107 = 201$ ms. En incluant le message de retour indiquant l'exécution de la commande, ce délai est de 400 msec.

Délai de retransmission de commandes joystick et volant

L'interface-opérateur transmet les commandes de l'opérateur à un cycle près de l'interface-opérateur. L'interface-opérateur répète les commandes du volant et du joystick régulièrement et tant que les boutons ne sont pas relâchés par l'opérateur pour indiquer au robot de cesser la commande de ce mécanisme.

```
STime 18107
*IMS Interface 26 18107 ;
MVD 1 0 -12880 ;
END 26 ;
FDREADPORTAV
STime 18117
FDREADPORTAV
STime 18137
IMAGEONSCREEN
STime 18147
STime 18157
STime 18167
STime 18177
STime 18187
STime 18197
VCIMESSAGESENDED
STime 18217
FDREADPORTAV
STime 18227
FDREADPORTAV
STime 18237
IMAGEONSCREEN
FDREADPORTCS
ROBOT-->
*RGM robot1 118 19226 ;
ST 8 0 3 0 0 0 0 3 0 ;
PW 1 55 66 23899 -1 ;
END 118 ;
*RMM robot1 119 19226 ;
TS 2006 7 1 10 10 49 14 136 ;
POS 11 6000 6975 13652 0 0 ;
IR 16 133 65535 65535 65535 170 65535 360 134 136 65535 65535 174 65535 65535 65535 133 ;
US 4 760 750 780 820 ;
BP 6 1 1 1 1 1 1 ;
END 119 ;
<--ROBOT
STime 18247
STime 18257
STime 18267
STime 18287
STime 18297
STime 18308
*IMS Interface 27 18308 ;
MVD 1 0 -13440 ;
END 27 ;
VCIMESSAGESENDED
```

```

STime 18318
FDREADPORTAV
STime 18328
FDREADPORTAV
STime 18338
FDREADPORTAV
FDREADPORTCS
ROBOT-->
*RMM robot1 120 19334 ;
TS 2006 7 1 10 10 49 14 244 ;
POS -13 0 6975 13652 0 0 ;
IR 16 132 65535 65535 65535 172 65535 360 134 137 65535 65535 177 65535 65535 65535 133 ;
US 4 760 750 780 820 ;
BP 6 1 1 1 1 1 1 ;
END 120 ;
<--ROBOT

```

Le délai de retransmission des commandes de volant et de Joystick (MVD) mesuré est de :
 $18308 - 18107 = 201$ millisecondes.

Tests de délais de rétroaction commande-positionnement du modèle

Deux tests de délais ont été faits. Les graphiques suivants présentent le tracé des messages de commandes de l'interface-opérateur et les messages de positionnement du robot correspondant.

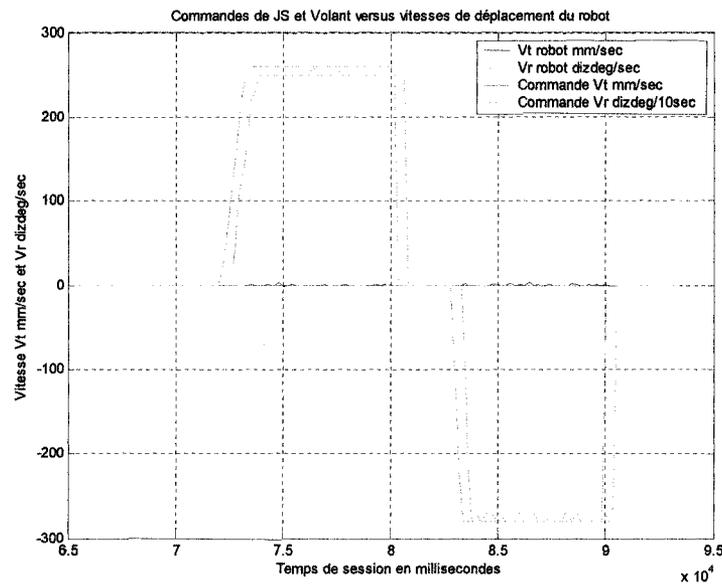


Figure C.1 : Délais de rétroaction, essais 1

La figure C.1 présente un graphique du décalage entre la commande de déplacement envoyée et le temps de réception de la confirmation de son exécution. Pour connaître la valeur du délai réel entre la commande et l'exécution par le robot, il faut soustraire le délai moyen de communication entre le robot et l'interface-opérateur. Le délai d'action des commandes observée est de 0,51 sec de retard moins 0,089 sec, soit 0,421 sec.

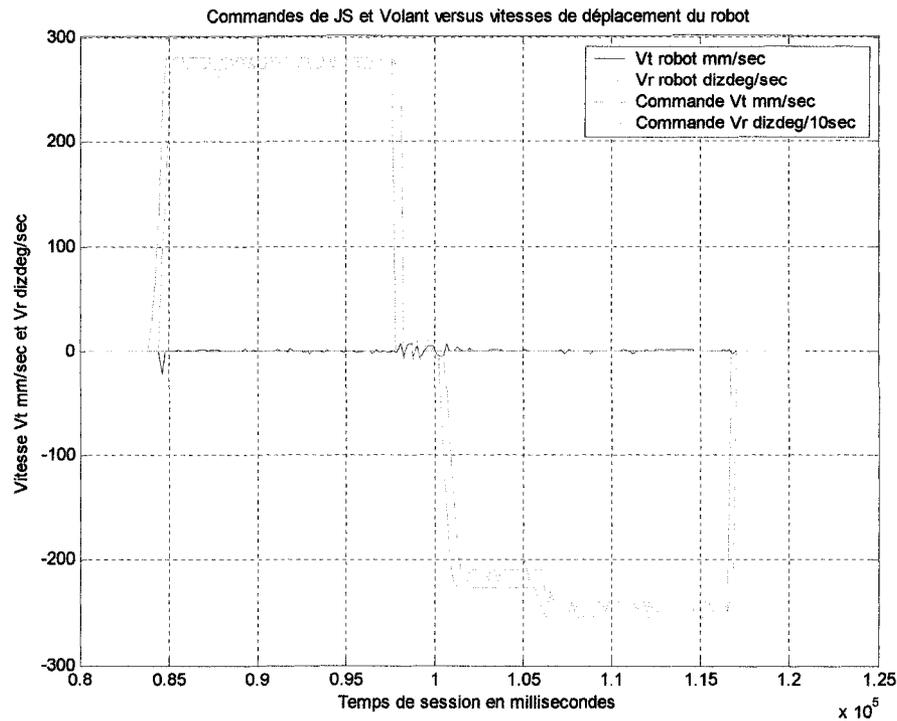


Figure C.2 : Délais de rétroaction, essais 2

Pour la figure C.2 le délai d'action des commandes observée est de 0,47 sec, de retard moins 0,089 sec soit 0,381 sec.

Il en résulte une valeur moyenne de 0,4 sec.

Performances de rafraîchissement des vues de l'interface-opérateur

Des tests de mesure des délais de cycle de rafraîchissement ont été faits avec un ordinateur IBM R40 (processeur Centrio de 1,6 Ghz) et Windows XP roulant le programme de l'interface-opérateur. Le taux de rafraîchissement des images vidéo était de 10 fps et avec une résolution de 320x240. Le robot est en communication par réseau sans fil 802.11b avec un routeur Linksys.

La configuration visuelle VC de la figure 4.7 a un temps de rafraîchissement de 8,8 msec; celle de la figure 4.8 en RA sans la vue de la carte ni celle du robot est de 10,5 msec, et avec la vue de la carte elle est de 11,5 msec; celle de la modalité ME de la figure 4.9 est de 9,7 msec.

Test de correspondance du modèle et du vidéo

La figure C-1 montre le résultat de la superposition pour la vue d'un corridor où le mur du bout se trouve à une distance de 14,915 mètres du robot. Les lignes de murs en parallaxes correspondent bien à celles de la vue vidéo. La différence la plus appréciable est celle de la position verticale du seuil du mur lointain au bas de la porte au centre de l'écran par rapport à celle de la vue vidéo. Ce seuil dans la vue vidéo est 8 cm plus bas que sa représentation dans le modèle 3D. Cette différence est occasionnée par l'angle horizontal

avant arrière de la caméra qui ne serait pas parfaitement horizontal. Cette erreur correspond à une erreur d'angle vertical de 0,3 degré.



Figure C.3 : Test de superposition de la vue vidéo et du modèle

Test d'extrapolation linéaire de position

Un algorithme d'extrapolation de la position du robot est implanté dans le système afin d'éviter l'apparition de disparité entre les positions du robot (rafraîchies aux 200 ms) qui sont utilisées pour positionner le modèle à l'écran et les images vidéo affichées aux 100 ms avec la modalité RA. Les tests d'extrapolation sont présentés à l'annexe D.3. Les performances d'extrapolation obtenues sont autour de 14.4% lorsque le robot accélère en rotation et de 9.1% lorsque la rotation est à vitesse constante. L'accélération introduit donc environ 5.3% d'erreur supplémentaire. L'erreur de 9.1% serait occasionnée par les délais de communication et de traitement du robot.

Log de test d'extrapolation

Le log suivant présente les résultats de calcul de la fonction d'extrapolation de la position du robot entre deux transmissions de position.

«\20060721\logMessTUI_F08b.txt »

Extrapolation lors de vitesse de rotation constante

```

***      k= -1652 Vr= 12000Yaw= 1.78991
FDREADPORTAV
FDREADPORTCS
ROBOT-->
*RMM robot1 107 17520 ;
TS 2006 7 5 21 12 4 41 570 ;
POS -2 -12000 7039 13564 0 359000 ;
IR 16 133 65535 65535 65535 167 65535 266 138 136 65535 65535 181 65535 65535 65535 129 ;
US 4 590 520 450 390 ;
BP 6 1 1 1 1 1 1 ;
END 107 ;
<--ROBOT
STime 16375
###      yawRecv= -359
IMAGEONSCREEN
STime 16395
***      k= 359000Vr= 12000Yaw= -358.867
STime 16405
***      k= 358867Vr= 12000Yaw= -358.729

```

```

STime 16415
*** k= 358728Vr= 12000Yaw= -358.589
STime 16425
*IMS Interface 43 16425 ;
MVD 1 0 -14000 ;
END 43 ;
*** k= 358588Vr= 12000Yaw= -358.449
STime 16435
*** k= 358448Vr= 12000Yaw= -358.31
VCIMESSAGESENDED
STime 16445
*** k= 358310Vr= 12000Yaw= -358.172
FDREADPORTAV
STime 16465
*** k= 358171Vr= 12000Yaw= -358.032
FDREADPORTAV
STime 16475
*** k= 358031Vr= 12000Yaw= -357.892
FDREADPORTAV
STime 16486
*** k= 357891Vr= 12000Yaw= -357.753
IMAGEONSCREEN
STime 16496
*** k= 357752Vr= 12000Yaw= -357.615
STime 16506
*** k= 357615Vr= 12000Yaw= -357.47
STime 16516
*** k= 357469Vr= 12000Yaw= -357.331
STime 16536
*** k= 357330Vr= 12000Yaw= -357.191
STime 16546
*** k= 357191Vr= 12000Yaw= -357.052
VCIMESSAGESENDED
STime 16556
*** k= 357052Vr= 12000Yaw= -356.914
FDREADPORTAV
STime 16566
*** k= 356914Vr= 12000Yaw= -356.775
FDREADPORTAV
FDREADPORTCS
ROBOT-->
*RMM robot1 108 17731 ;
TS 2006 7 5 21 12 4 41 781 ;
POS 2 -13000 7039 13564 0 356000 ;
IR 16 131 65535 65535 65535 174 65535 65535 141 138 65535 65535 180 65535 65535 65535 129 ;
US 4 590 510 450 380 ;
BP 6 1 1 1 1 1 1 ;
END 108 ;
<--ROBOT
STime 16576
### yawRecv= -356
IMAGEONSCREEN
STime 16586
*** k= 356000Vr= 13000Yaw= -355.745
STime 16606
*** k= 355745Vr= 13000Yaw= -355.681

```

Extrapolation pour un intervalle d'un cycle du TUI :

Temps du cycle : 16405- 16395 = 10 msec

Résultat de l'extrapolation : 358.867 – 358.729 = 0.138 degrés pour 10 msec

Angle parcouru par le robot = 12.000 deg/sec * 0.01 sec = 0.12 degrés

Erreur d'extrapolation instantanée ((0.138 - 0.12) / 0.12) * 100 = 1.8 %

Extrapolation pour un cycle de message du robot :

Temps total : 17520 à 17731 = 211 msec

Résultat de l'extrapolation (voir note plus bas) : $(356.775 - (356.914 - 356.775)) = 356.636$

Note : Le log ne fait pas ressortir la valeur du dernier cycle d'extrapolation car la réception du message redémarre l'extrapolation. Il faut donc ajouter une valeur de calcul d'extrapolation égale à la valeur typique avant la réception du message de position du robot (356.914 - 356.775).

Vitesse moyenne du robot = $(12.000 + 13.000)/2 = 12.5$

Angle parcouru par le robot : $12.5 \text{ deg/sec} * 0.211 \text{ sec} = 2.6375 \text{ degrés}$

Angle donné par les positions du robot = $359.000 - 356.000 = 3 \text{ degrés}$

Erreur du robot sur ces données de vitesse et de position = $((2.6375 - 3) / 2.6375) * 100 = 13.7\%$

Angle réel de position du robot = $359 - 2.6375 = 356.363$

Erreur globale sur l'angle d'extrapolation entre deux positionnements du robot lorsque la vitesse de rotation est constante : $(356.636 - 356.363)/3 * 100 = 9.1\%$

Extrapolation lors de vitesse de rotation non constante (accélérée à 14.5 deg/sec²)

```
STime 13311
*** k= 34000 Vr= 0 Yaw= -34
FDREADPORTAV
FDREADPORTCS
ROBOT-->
*RMM robot1 88 14460 ;
TS 2006 7 5 21 12 4 38 510 ;
POS 5 -5000 7037 13563 0 34000 ;
IR 16 132 65535 65535 65535 168 65535 161 134 139 65535 65535 180 65535 65535 65535 129 ;
US 4 470 480 500 550 ;
BP 6 1 1 1 1 1 ;
END 88 ;
<--ROBOT
STime 13321
### yawRecv= -34
IMAGEONSCREEN
STime 13331
*** k= 34000 Vr= 5000 Yaw= -33.9452
STime 13341
*** k= 33945 Vr= 5000 Yaw= -33.8855
STime 13351
*** k= 33885 Vr= 5000 Yaw= -33.8268
STime 13361
*** k= 33826 Vr= 5000 Yaw= -33.7681
STime 13381
*IMS Interface 25 13381 ;
MVD 1 0 -14000 ;
END 25 ;
*** k= 33768 Vr= 5000 Yaw= -33.7097
VCIMESSAGESENDED
STime 13391
*** k= 33709 Vr= 5000 Yaw= -33.651
FDREADPORTAV
STime 13401
*** k= 33650 Vr= 5000 Yaw= -33.5912
FDREADPORTAV
STime 13411
*** k= 33591 Vr= 5000 Yaw= -33.5327
FDREADPORTAV
STime 13421
*** k= 33532 Vr= 5000 Yaw= -33.4741
IMAGEONSCREEN
STime 13431
*** k= 33474 Vr= 5000 Yaw= -33.4157
STime 13451
*** k= 33415 Vr= 5000 Yaw= -33.3538
STime 13461
```

```

***      k= 33353 Vr= 5000 Yaw= -33.2944
STime 13471
***      k= 33294 Vr= 5000 Yaw= -33.2361
STime 13481
***      k= 33236 Vr= 5000 Yaw= -33.1776
VCIMESSAGESENDED
STime 13491
***      k= 33177 Vr= 5000 Yaw= -33.1189
FDREADPORTAV
STime 13501
***      k= 33118 Vr= 5000 Yaw= -33.0595
FDREADPORTAV
STime 13521
***      k= 33059 Vr= 5000 Yaw= -33.0007
FDREADPORTAV
FDREADPORTCS
ROBOT-->
*RMM robot1 89 14667 ;
TS 2006 7 5 21 12 4 38 717 ;
POS 2 -8000 7038 13563 0 32000 ;
IR 16 135 65535 65535 65535 161 65535 170 134 136 65535 65535 181 65535 65535 65535 129 ;
US 4 480 520 570 550 ;
BP 6 1 1 1 1 1 1 ;
END 89 ;
<--ROBOT
STime 13531
###      yawRecv= -32
IMAGEONSCREEN
STime 13541
***      k= 32000 Vr= 8000 Yaw= -31.9074
STime 13551

```

Extrapolation pour un intervalle d'un cycle du TUI :

Temps du cycle : 13341- 13331 = 10 msec

Résultat de l'extrapolation : 33.9452 - 33.8855 = 0.0597 degré

Angle parcouru par le robot = 5.000 deg/sec * 0.01 sec = 0.05 degrés

Erreur d'extrapolation instantanée $((0.597 - 0.5)/0.05) * 100 = 1.94 \%$

Extrapolation pour un cycle de message du robot :

Temps total : 14667 – 14460 = 207 msec

Angle de position 34.000- 32.000 = 2 degrés

Résultat de l'extrapolation (voir note plus bas) : $(33.0007 - (33.0595 - 33.0007)) = 32.942$

Note : Le log ne fait pas ressortir la valeur du dernier cycle d'extrapolation car la réception du message redémarre l'extrapolation. Il faut donc ajouter une valeur de calcul d'extrapolation égale à la valeur typique avant la réception du message de position du robot (33.0595 – 33.0007).

Vitesse moyenne du robot : $(5.000 + 8.000) / 2 = 6.500 \text{ deg/sec}$

Angle parcouru par le robot : $6.5 \text{ deg/sec} * 0.207 \text{ sec} = 1.3455 \text{ degrés}$

Erreur du robot sur ces données de vitesse et de position : $((2-1.345)/2 * 100) = 32.75\%$

Angle réel de position du robot : $34 - 1.3455 = 32.6545 \text{ degrés}$

Erreur globale sur l'angle d'extrapolation entre deux positionnements du robot lorsque la vitesse de rotation est en accélération : $(32.942 - 32.6545)/2 * 100 = 14.4\%$

Performances de positionnement à l'arrêt de commande

La distance moyenne parcourue lors de trois essais et dû au délai de communication et à la décélération du robot une fois une commande d'arrêt envoyée est de :

- En translation à vitesse maximum (30 cm/sec), le dépassement moyen est de 97 mm avec un écart-type de 15 mm, et avec une vitesse de 50 % de la vitesse maximum, il est de 50 mm.
- En rotation à vitesse de rotation maximum (28°/sec), le dépassement est de 21 degrés (demie de l'écran vidéo), et avec une rotation à 50% de la rotation maximum, il est de 10.5° (quart de l'écran).

Ces dépassements occasionnent une difficulté supplémentaire à l'opérateur pour l'anticipation de la position d'arrêt réel du robot lors du relâchement des commandes du joystick et du volant.

Performances de rotation lors de translation

Pour une vitesse de translation nulle, une commande de rotation à 28°/sec produit une rotation de 28°/sec. Pour une vitesse de translation du robot de 300 mm/sec, une commande de rotation à 28°/sec produit une rotation réelle de 10°/sec seulement. Ceci est dû à l'algorithme de contrôle moteur implanté dans le robot.

Caractérisation des erreurs de positionnement dans le parcours

Deux tests de positionnement ont été faits chacun dans les deux parcours de tests A et B, en traçant sur le sol les déplacements précis du robot et en les mesurant de façon à les comparer avec les valeurs retournées par le module de localisation du robot. Une mesure du bruit de positionnement du module a aussi été faite en prenant les valeurs minimum et maximum transmises à l'interface-opérateur alors que le robot est en position d'arrêt sur ces points des parcours. Ces erreurs ont un impact sur la qualité du rendu de la modalité en RA, à cause de la superposition du modèle 3D avec les images vidéo. Elles ont aussi un impact sur la modalité ME lors de passage entre les objets rapprochés comme le passage au travers d'un cadre de porte.

Pour les points du parcours A, la valeur du bruit d'angle est de $\pm 0,2$ degré (écart-type de 0,4) alors que celui du parcours B il est de $\pm 0,1$ degré (écart-type de 0,4). L'erreur moyenne de distance du bruit de positionnement pour le parcours A est de ± 21 mm (écart-type de 18 mm) et pour le parcours B de ± 13 mm (écart-type de 10 mm). Si l'on retient les valeurs les plus élevées de moyenne, il en résulte un bruit d'angle de $\pm 0,2$ degré et de distance de ± 2 cm.

L'erreur de positionnement angulaire sur les points du parcours A est de $\pm 1,3$ degré (écart-type de 1,1 degré) et pour la position de ± 57 mm (écart-type de 28 mm). Pour le parcours B l'erreur de positionnement angulaire est de $\pm 1,2$ degré (écart-type de 1,7 degré) et pour la position de ± 40 mm (écart-type de 17 mm). Si l'on prend les valeurs maximum de moyenne, il en résulte une erreur d'angle de positionnement de $\pm 1,3$ degré et de ± 6 cm.

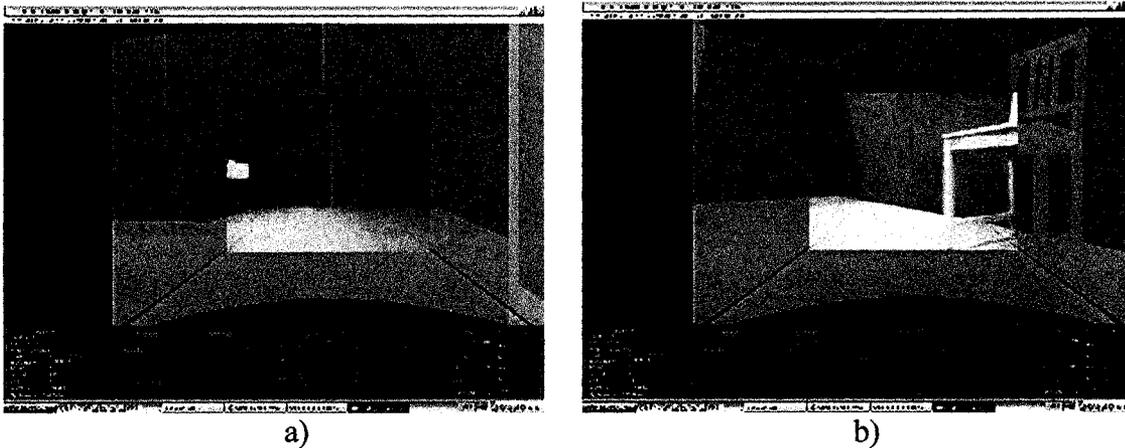


Figure C.4 Résultats visuels de l'erreur de position du modèle dans le parcours A : a) objet à droite et b) objet à gauche

L'erreur de positionnement du robot est fonction de la présence rapprochée d'objets d'un côté ou de l'autre, et l'erreur est dans le sens opposé de la position de l'objet. La capture d'écran présentée à la figure C.4 a) montre la performance d'alignement entre le modèle et les images vidéo de la caméra du robot. Sur cette vue, le positionnement du modèle est légèrement trop à gauche par rapport à la position réelle de la caméra du robot, à cause de la présence rapprochée d'un objet à la droite du robot (une armoire). La figure C.4 b) de son côté montre un décalage du modèle vers la droite qui est dans ce cas influencé par une patte de table à la gauche du robot.

La figure C.5 présente deux captures d'écran montrant des conditions extrêmes de perturbations momentanées de la position du robot pour la superposition du flux vidéo avec le modèle virtuel. Pour la vue C.5 a), deux objets se trouvent rapprochés de part et d'autre du robot, ce qui a pour effet de perturber l'angle et la distance de la chaise. Ceci serait dû à des limitations du logiciel CARMEN et à son implantation dans le robot. Dans la vue C.5 b), la vue du robot est grandement obstruée par un objet du côté droit, ce qui occasionne une erreur d'angle plus importante dans la position du modèle.

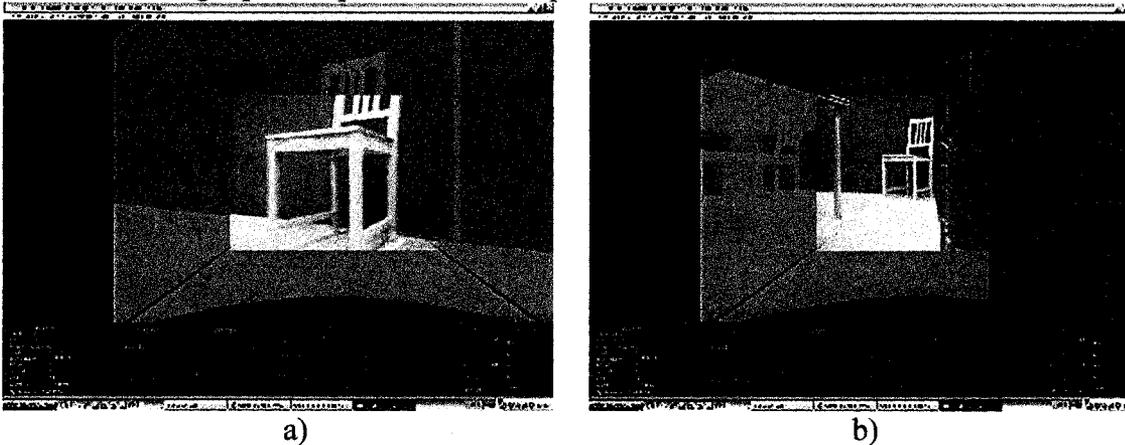


Figure C.5 a) Deux objets et b) Obstruction importante à droite

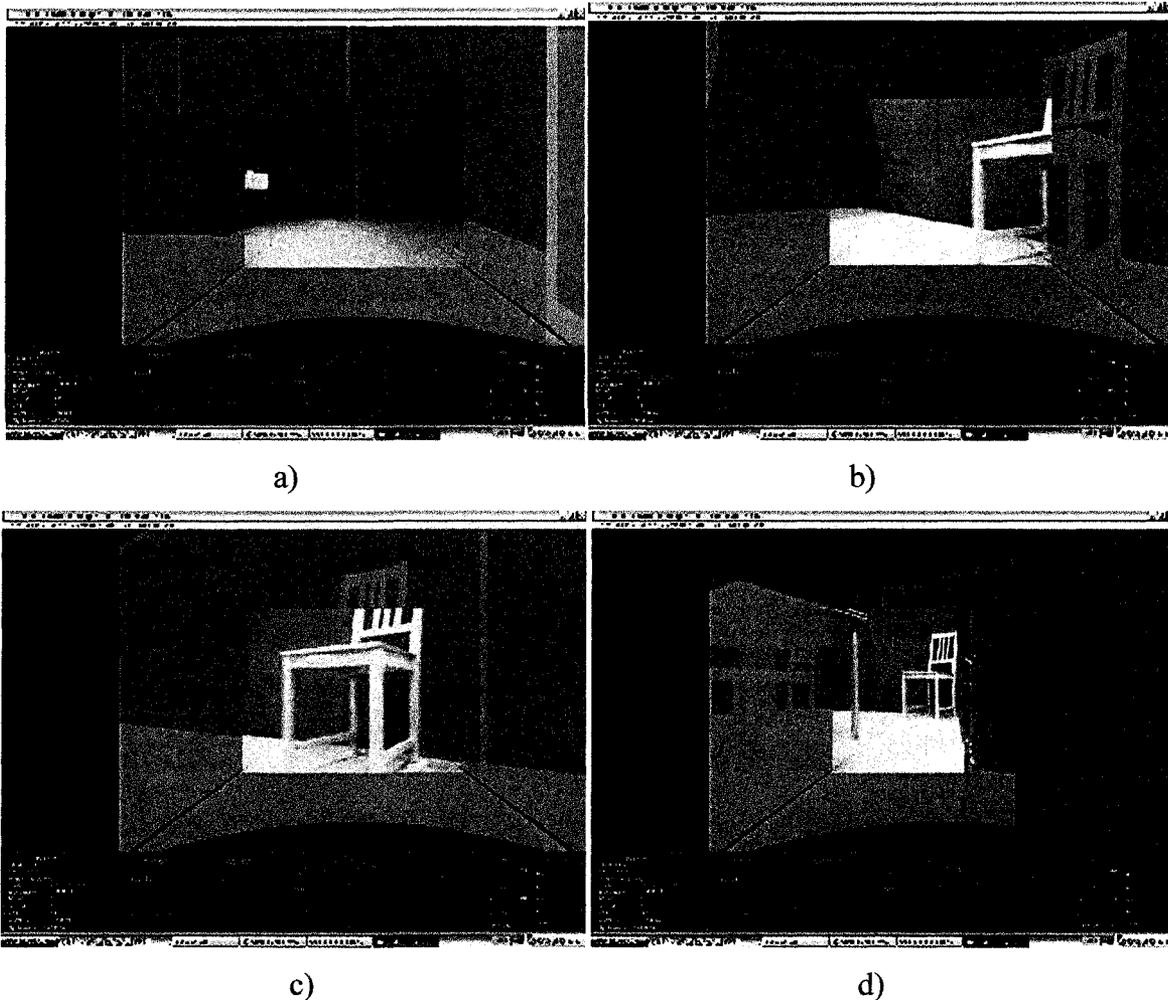
Enfin, les écarts de positionnement produisent des décalages des objets quand dans les faits le robot ne bouge pas. L'observateur assume alors que le robot se déplace linéairement sans saut, ce qui n'est pas le cas si le modèle est décalé à droite temporairement et ramené à sa position originale. L'opérateur perçoit alors une rotation momentanée du côté droit du robot. Donc avec la modalité de visualisation en RA, le modèle peut introduire une impression de rotation dû aux erreurs de positionnement angulaire.

Erreurs de positionnement dans la cuisine

Un test de positionnement du robot sur douze points différents du parcours de la cuisine a été fait. Les points ont été répartis sur le parcours aux endroits où les écarts observés étaient les plus grands en termes de distance. Le robot a été arrêté sur chacun de ces points et des valeurs minimum et maximum de position ont été enregistrées. Ces valeurs ont permis de déterminer la valeur du bruit de positionnement du module de localisation CARMEN incluant les senseurs lorsque le robot est en arrêt. La valeur du bruit d'angle est négligeable 0,2 degré (écart-type de 0,4) alors que celui de distance ne l'est pas et correspond à une moyenne de ± 21 mm (écart-type de 18 mm). Les deux dernières colonnes du tableau présentent les erreurs moyennes de positionnement qui sont pour l'angle de $\pm 1,3$ degré (écart-type de 1,1 degré) et pour la position de ± 57 cm (écart-type de 28 mm).

TABLEAU C-2 RESULTATS DE POSITIONNEMENT DANS LA CUISINE

Point du parcours cuisine	Bruit de position du module de localisation		Écart de position lors de déplacements	
	Angle	Distance	Angle	Distance
1	0	29	1	99
2	1	8	1	89
3	0	71	2	64
4	0	19	1	70
5	0	17	2	22
6	0	33	3	36
7	0	10	0	62
8	0	26	2	100
9	0	5	3	34
10	0	8	1	32
11	1	11	1	31
12	0	12	0	47
Moyenne	0,2	21	1,3	57
Écart type	0,4	18	1,1	28



Figures C.6 Décalages lors de la superposition du modèle 3D avec la vue vidéo a) à d)

Erreurs de positionnement dans le corridor

Un test de positionnement du robot sur sept points différents du parcours du corridor a été fait. Les points ont été répartis sur le parcours aux endroits où les écarts observés étaient les plus grands en termes de distance. Le robot a été arrêté sur chacun de ces points et des valeurs minimum et maximum de position ont été enregistrées. Ces valeurs ont permis de déterminer la valeur du bruit de positionnement du module de localisation CARMEN incluant les senseurs lorsque le robot est en arrêt (colonnes 2 et 3 du tableau). La valeur du bruit d'angle est négligeable 0,1 degré (écart-type de 0,4) alors que celui de distance ne l'est pas et correspond à une moyenne de ± 13 mm (écart-type de 10 mm). Les deux dernières colonnes du tableau présentent les erreurs moyennes de positionnements qui sont pour l'angle de $\pm 1,2$ degré (écart-type de 1,7 degré) et pour la position de ± 40 mm (écart-type de 17 mm).

TABLEAU C-3 RESULTATS D'ERREUR DE POSITIONNEMENT DANS LE CORRIDOR

Points du parcours corridor	Bruit de position du module de localisation		Écart de position lors de déplacements	
	Angle	Distance	Angle	Distance
1	0	8	0	52
2	0	14	1	22
3	0	9	0	71
4	1	36	1	30
5	0	9	5	44
6	0	7	1	25
7	0	12	1	33
Moyenne	0,1	13	1,2	40
Écart type	0,4	10	1,7	17

ANNEXE D - Séquencement des essais d'opérabilité

TABLEAU D.1 SÉQUENCE D'ESSAIS RÉALISÉS PAR LES OPÉRATEURS NOVICES

Participant	Type	Séquence ⁵	Vue 1	Vue 2	Vue 3
1	A	CUI - COR	VC	RA	ME
2	B	CUI - COR	VC	ME	RA
3	C	CUI - COR	RA	VC	ME
4	D	CUI - COR	RA	ME	VC
5	A	CUI - COR	VC	RA	ME
6	C	CUI - COR	RA	VC	ME
7	E	CUI - COR	ME	VC	RA
8	F	CUI - COR	ME	RA	VC
9	G	COR - CUI	VC	RA	ME
10	H	COR - CUI	VC	ME	RA
11	I	COR - CUI	RA	VC	ME
12	J	COR - CUI	RA	ME	VC
13 rejeté	K	COR - CUI	ME	VC	RA
14	L	COR - CUI	ME	RA	VC
15	B	CUI - COR	VC	ME	RA
16	D	CUI - COR	RA	ME	VC
17	E	CUI - COR	ME	VC	RA
18	F	CUI - COR	ME	RA	VC
19 rejeté	G	COR - CUI	VC	RA	ME
20	A	CUI - COR	VC	RA	ME
21	H	COR - CUI	VC	ME	RA
22	I	COR - CUI	RA	VC	ME
23	J	COR - CUI	RA	ME	VC
24	K	COR - CUI	ME	VC	RA
25	L	COR - CUI	ME	RA	VC
26	B	CUI - COR	VC	ME	RA
27	C	CUI - COR	RA	VC	ME
28	D	CUI - COR	RA	ME	VC
29	E	CUI - COR	ME	VC	RA
30	F	CUI - COR	ME	RA	VC
31	G	COR - CUI	VC	RA	ME
32	H	COR - CUI	VC	ME	RA
33	J	COR - CUI	RA	ME	VC
34	I	COR - CUI	RA	VC	ME
35	K	COR - CUI	ME	VC	RA
36	L	COR - CUI	ME	RA	VC
37	G	COR - CUI	VC	RA	ME
38	A	CUI - COR	VC	RA	ME
39	B	CUI - COR	VC	ME	RA

Modalités : VC = vidéo et carte, RA = réalité augmentée, ME = mixte exocentrique
 Séquence des pièces : CUI = cuisine dans le labo, COR = corridor

⁵ Chaque participant exécute les expériences dans l'ordre de la séquence de pièces spécifiées en utilisant les trois vues dans l'ordre des colonnes. Les opérateurs réalisent deux missions (chaque pièce) trois fois (une fois pour chacune des vues).

Le tableau D1 présente le déroulement réel des essais. Le tableau D2 présente comment les missions et les modalités sont alternées pour chaque opérateur novice.

TABLEAU D.2 ORDRE DES MISSIONS ET DES MODALITÉS PAR TYPE DE SÉQUENCEMENT

Type de séquençement	Nombre de tests	Ordre des missions	Ordre des modalités
A	4	Cuisine-Corridor	VC-RA-ME
B	4	Cuisine-Corridor	VC-ME-RA
C	3	Cuisine-Corridor	RA-VC-ME
D	3	Cuisine-Corridor	RA-ME-VC
E	3	Cuisine-Corridor	ME-VC-RA
F	3	Cuisine-Corridor	ME-RA-VC
G	3	Corridor-Cuisine	VC-RA-ME
H	3	Corridor-Cuisine	VC-ME-RA
I	3	Corridor-Cuisine	RA-VC-ME
J	3	Corridor-Cuisine	RA-ME-VC
K	2	Corridor-Cuisine	ME-VC-RA
L	3	Corridor-Cuisine	ME-RA-VC

Note :

Les résultats de deux participants ont été retirés de l'échantillon à cause de problèmes avec le système robotique.

La variation statistique à une légère variation non prévue à cause de la perte de cas de participants. Les types de séquence A et B comportent un cas de plus que les autres et le type K en a un de moins. Tous les autres varient trois fois.

ANNEXE E – Questionnaires opérateurs et d'utilisabilité

Questionnaire sur l'opérateur

No :

☞ Si votre vue requière de porter des lunettes ou des verres de contact vous devez les utiliser lors des tests.

Âge : _____

Homme Femme

Dernier degré de scolarité obtenu :

Étude en cours :

Profession :

Nombre d'heures moyen par semaine ou vous travaillez avec un ordinateur :

Nombre d'heures moyen par semaine de jeux vidéo sur ordinateur :

Avez-vous un problème de vision non corrigé ? OUI NON

Avez-vous un permis de conduire ? OUI NON

Combien d'heure de conduite faites-vous par semaine ?

Avez-vous déjà utilisé un système de téléopération de robot mobile équipé d'une caméra vidéo permettant de voir les lieux où le robot se déplace ? OUI NON

Si vous avez répondu oui à la dernière question, répondez aux suivantes, sinon vous avez terminé.

Quel est le nom de ce système ou robot ?

En avez-vous utilisé plus d'un ? quantité :

Combien de temps au total avez-vous fait de la téléopération ? heures :

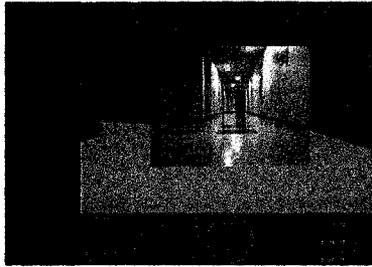
Questionnaire sur les expériences

Deux **missions** ont été réalisées, une dans la **cuisine** et l'autre dans le **corridor**.

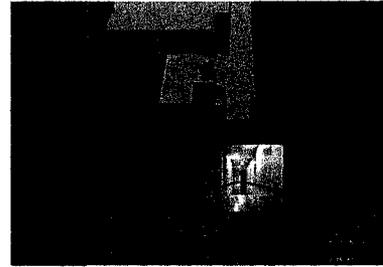
Trois **vues** ont été utilisées pour les expériences :



vidéo et carte



modèle élargi



modèle aérien

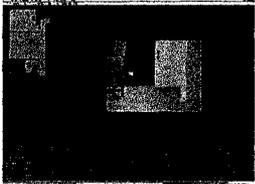
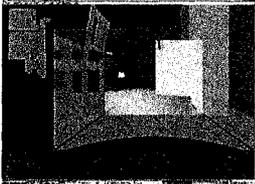
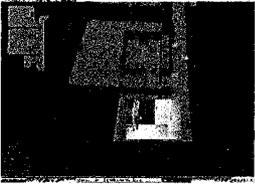
Les objectifs des missions de téléopération que vous avez réalisées étaient de déplacer et de positionner efficacement le robot le long de deux parcours, celui de la cuisine et celui du corridor.

On vous demande de répondre aux questions en utilisant les échelles d'évaluation proposées.

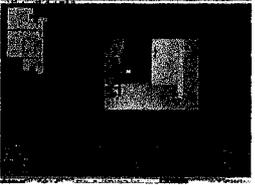
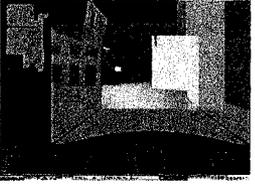
Les questions 1 à 6 se composent de deux parties, la première vous demandant d'évaluer la facilité d'utilisation et la seconde pour évaluer votre performance.

Question 1. CUISINE

A- Quel a été la facilité d'utilisation du système pour téléopérer le robot lors de la poussée de la porte d'armoire dans la cuisine? (encerclez la bonne réponse)

	Très difficile		Facile					Très facile	
Vidéo et carte	----- ----- ----- ----- -----								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Modèle élargi	----- ----- ----- ----- -----								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Modèle aérien	----- ----- ----- ----- -----								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9

B. Lors de la tâche de poussée de la porte d'armoire comment qualifiez-vous votre performance ? (encerclez la bonne réponse)

	Très inadéquate			Moyenne			Très adéquate		
Vidéo et carte	----- ----- ----- ----- -----								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Modèle élargi	----- ----- ----- ----- -----								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Modèle aérien	----- ----- ----- ----- -----								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Question 2. CUISINE

A. Quel a été la facilité d'utilisation du système pour téléopérer le robot lors du positionnement du robot pour la lecture des affiches dans la cuisine ? (encerclez la bonne réponse)

Vidéo et carte Très difficile Facile Très facile



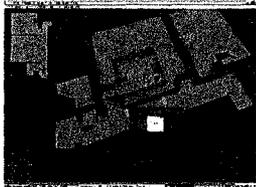
1 2 3 4 5 6 7 8 9

Modèle élargi



1 2 3 4 5 6 7 8 9

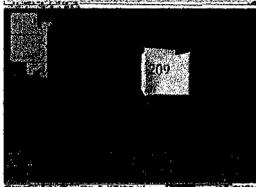
Modèle aérien



1 2 3 4 5 6 7 8 9

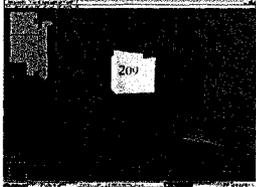
B. Lors de la tâche de positionnement du robot pour la lecture des affiches comment qualifiez-vous votre performance ? (encerclez la bonne réponse)

Vidéo et carte Très inadéquate Moyenne Très adéquate



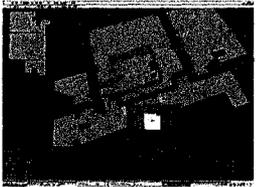
1 2 3 4 5 6 7 8 9

Modèle élargi



1 2 3 4 5 6 7 8 9

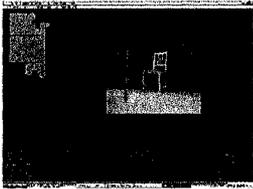
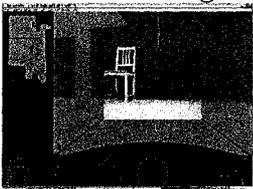
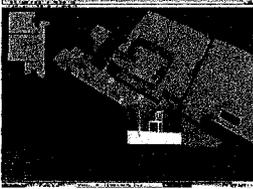
Modèle aérien



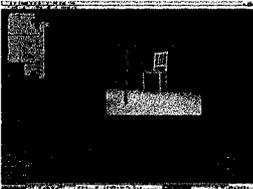
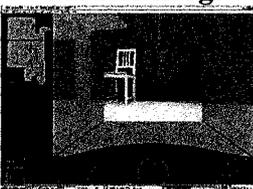
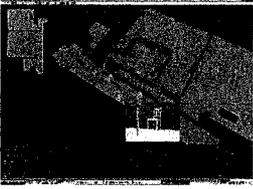
1 2 3 4 5 6 7 8 9

Question 3. CUISINE

A. Quel a été la facilité d'utilisation du système pour téléopérer le robot lors du déplacement entre les objets de la cuisine (armoire avec la porte fermée, table, chaises et boîtes) ? (encerclez la bonne réponse)

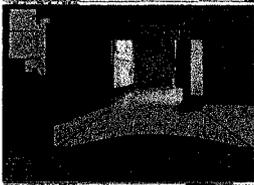
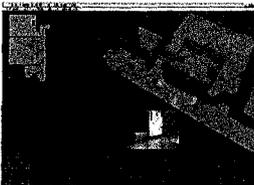
		Très difficile			Facile			Très facile		
Vidéo et carte		----- ----- -----								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Modèle élargi		----- ----- -----								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Modèle aérien		----- ----- -----								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9

B. Lors de la tâche de déplacement du robot entre les objets de la cuisine (armoire avec la porte fermée, table, chaises et boîtes) comment qualifiez-vous votre performance ? (encerclez la bonne réponse)

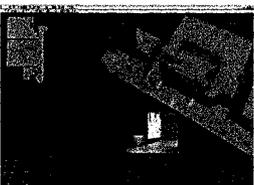
		Très inadéquate			Moyenne			Très adéquate		
Vidéo et carte		----- ----- -----								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Modèle élargi		----- ----- -----								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Modèle aérien		----- ----- -----								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9

Question 4. CORRIDOR

A. Quel a été la facilité d'utilisation du système pour téléopérer le robot lors du passage de porte ? (encerclez la bonne réponse)

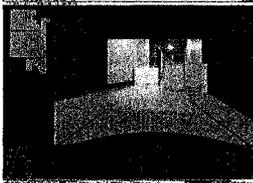
	Très difficile			Facile			Très facile		
Vidéo et carte	----- ----- -----								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Modèle élargi	----- ----- -----								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Modèle aérien	----- ----- -----								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9

B. Lors du passage de porte comment qualifiez-vous votre performance ? (encerclez la bonne réponse)

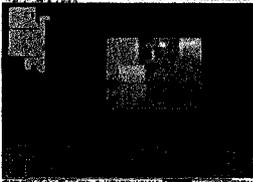
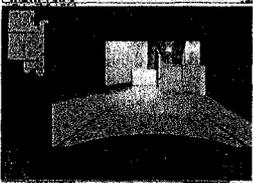
	Très inadéquate			Moyenne			Très adéquate		
Vidéo et carte	----- ----- -----								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Modèle élargi	----- ----- -----								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Modèle aérien	----- ----- -----								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Question 5. CORRIDOR

A. Quel a été la facilité d'utilisation du système pour téléopérer le robot lors du déplacement entre les boîtes blanches de slalom du corridor ? (encerclez la bonne réponse)

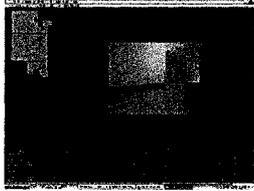
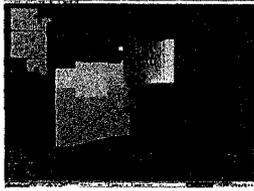
	Très difficile			Facile			Très facile		
Vidéo et carte	----- ----- -----								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Modèle élargi	----- ----- -----								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Modèle aérien	----- ----- -----								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9

B. Lors du déplacement du robot entre les boîtes blanches de slalom du corridor comment qualifiez-vous votre performance ? (encerclez la bonne réponse)

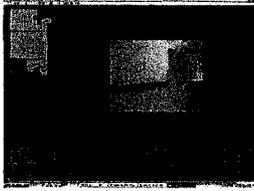
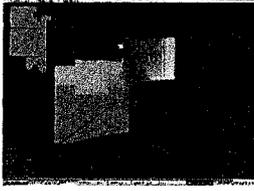
	Très inadéquate			Moyenne			Très adéquate		
Vidéo et carte	----- ----- -----								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Modèle élargi	----- ----- -----								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Modèle aérien	----- ----- -----								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Question 6. CORRIDOR

A. Quel a été la facilité d'utilisation du système pour téléopérer le robot lors du positionnement du robot pour la lecture de l'affiche dans le corridor ? (encerclez la bonne réponse)

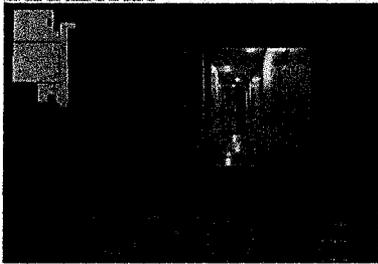
		Très difficile						Facile				Très facile
	Vidéo et carte											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
	Modèle élargi											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
	Modèle aérien											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		

B. Lors du positionnement du robot pour la lecture de l'affiche dans le corridor comment qualifiez-vous votre performance ? (encerclez la bonne réponse)

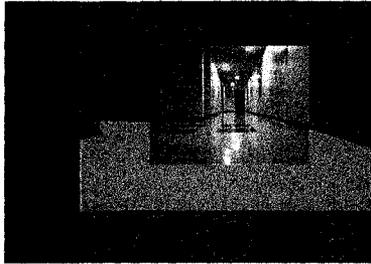
		Très inadéquate						Moyenne				Très adéquate
	Vidéo et carte											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
	Modèle élargi											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
	Modèle aérien											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		

7- Quelle vue est la plus facile à utiliser pour téléopérer le robot dans le corridor ?

Cochez une vue.



vidéo et carte



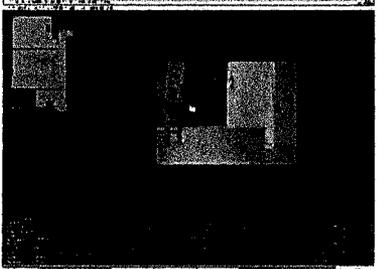
modèle élargi



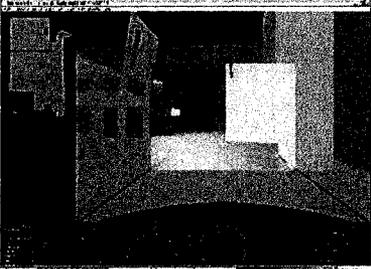
modèle aérien

8- Quelle vue est la plus facile à utiliser pour téléopérer le robot dans la cuisine ?

Cochez une vue.



vidéo et carte



modèle élargi



modèle aérien

9- Globalement, quelle vue préférez-vous le plus ?

Cochez une vue.



vidéo et carte



modèle élargi



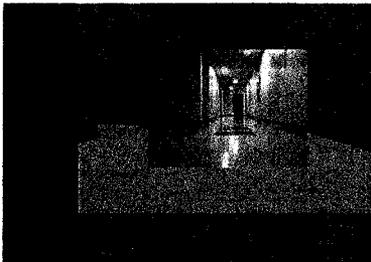
modèle aérien

10- Globalement, quelle vue préférez-vous le moins ?

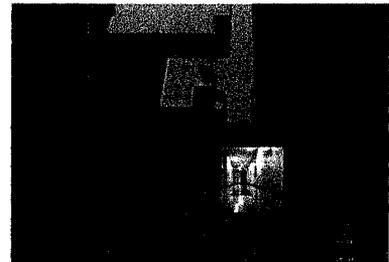
Cochez une vue.



vidéo et carte



modèle élargi



modèle aérien

11- Comment avez- vous trouvé les vitesses de déplacement du robot ?

Cochez votre réponse.

Trop lentes **correctes** **trop rapides**

12- Comment avez-vous apprécié votre expérience ?

13- Qu'est-ce qui vous a le plus dérangé dans l'interface lors des expériences ?

14- Qu'est-ce qui vous a le plus étonné ?

15- Selon vous quelles améliorations pourrions-nous apporter à l'interface ?

16- Selon vous quelles améliorations pourrions-nous apporter au robot ?

Vos commentaires :

A Pilot Study on Teleoperated Mobile Robots in Home Environments

**Daniel Labonté, François Michaud, Patrick Boissy, Hélène Corriveau,
Richard Cloutier, Marc André Roux**

Département de génie électrique et informatique

Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada J1K 2R1