

Téléopération, télérobotique et Internet : Techniques & applications

Auteur : Samir Otmane

Université d'Evry Val d'Essonne / UFR S&T
Laboratoire IBISC (Informatique, Biologie Intégrative et Systèmes Complexes)
CNRS-FR 2873
<http://lsc.univ-evry.fr/~otmane>

TELEOPERATION, TELEROBOTIQUE ET INTERNET : TECHNIQUES & APPLICATIONS	1
1. Introduction	4
2. La téléopération et la télérobotique	4
2.1. Bref historique	4
2.2. La téléopération	5
2.3. La télérobotique.....	9
2.4. Quelques domaines d'application.....	9
2.4.1. Le domaine nucléaire.....	9
2.4.2. Le domaine spatial.....	10
2.4.3. Le domaine militaire.....	12
2.4.4. Le domaine sous-marin	13
2.4.5. Le domaine médical et l'aide aux personnes handicapées	14
3. Internet et les environnements télérobotiques	16
3.1. Les systèmes de téléopération non collaboratifs	17
3.1.1. Australia's Telerobot on the Web	17
3.1.2. PumaPaint project.....	18
3.1.3. Projet E-productique.....	19
3.1.4. Le système ARITI	20
3.2. Vers la téléopération collaborative via Internet.....	22
3.2.1. Projet Ouidja 2000.....	22
3.2.2. Le système Tele-Actor.....	23
4. ARITI-C : Un collecticiel pour la téléopération collaborative via internet. 24	
4.1. Architecture logicielle de ARITI-C	25
4.1.1. Un système multi-agents pour la téléopération collaborative.....	25
4.1.2. Architecture générale.....	28
4.2. Interface homme-machine de ARITI-C.....	30
4.2.1. Interface principale.....	30
4.2.2. Interface de collaboration	31
4.2.3. Interface d'analyse et dévaluation de la collaboration.....	36
5. La téléopération assistée par la réalité virtuelle et la réalité augmentée	38
5.1. La Réalité Virtuelle (RV)	38
5.1.1. Définition.....	38
5.1.2. Synthèse des domaines d'application de la RV	39
5.2. La Réalité Augmentée (RA)	41
5.2.1. Définition.....	41

5.2.2. Synthèse des domaines d'application de la RA	42
5. 3. La téléopération assistée par la réalité augmentée	43
6. Synthèse et problématiques	46
7. Bibliographie.....	50
7. 1. Sur la téléopération, télérobotique, réalité virtuelle et réalité augmentée...	50
7. 2. Sur la téléopération via Internet, travail collaboratif	53

1. Introduction

Ces dernières années, les technologies de l'information et de la communication ont permis d'un côté, pour les activités du tertiaire de ne plus concentrer la production du service dans un lieu unique. D'un autre côté, ces technologies ont permis de dispenser la présence de l'homme dans des milieux dangereux (milieu nucléaire, haute température, etc.) ou tout simplement pour des missions d'exploration (milieu sous-marin, spatial, etc.).

Dans ce chapitre, nous présentons une forme de télétravail (travail à distance), celle liée au contrôle à distance de systèmes robotisés, nous présenterons alors la télérobotique et la téléopération et nous verrons comment les techniques de la réalité virtuelle et augmentée ont contribué à lever certains verrous liés généralement à la distance qui sépare l'opérateur (l'utilisateur) du robot à contrôler. Parmi ces verrous, nous nous intéresserons à celui de la gestion des retards dus au flux important de données multimédia qui transitent entre les sites maître (où se trouve l'opérateur humain) et le site esclave (où agit le ou les robots).

L'objectif principal de ce chapitre est de présenter une synthèse et une classification par domaines d'application de la téléopération/télérobotique, réalité virtuelle et réalité augmentée.

2. La téléopération et la télérobotique

Nous proposons ici un bref historique et une synthèse ainsi qu'un classement succinct des systèmes robotiques sur la base du mode de contrôle utilisé. Le terme contrôle désigne ici aussi bien la commande au sens de l'automatique que les interactions entre l'homme et la machine. Généralement le mode de contrôle est choisi en fonction de l'application selon plusieurs critères (La complexité de la tâche à accomplir, la nature des moyens de transmission, la charge de travail acceptable par l'opérateur, la puissance de calcul et les algorithmes embarqués à bord, les capteurs disponibles, etc.).

2.1. *Bref historique*

Vers l'année 1770, la construction de machines simples, ainsi que leur mécanisation a marqué le départ de la révolution industrielle. Au début du 20^{ème} siècle, les machines automatiques fixes et les chaînes de montage permettent le

développement de la production de masse. Le travail à la chaîne favorise l'accroissement des taux de production en réduisant les temps de fabrication. Les cycles d'usinage et de montage sont simples, répétitifs et à cadence fixe.

Apparaissent alors des machines-outils munies de commandes automatiques rudimentaires, telles que les matrices de programmation par fiches qui permettent d'effectuer des séquences d'opérations prédéterminées. Les machines à copier permettent d'usiner des pièces par copie des déplacements d'un palpeur sur un gabarit modèle au moyen de moteurs asservis qui commandent les mouvements de l'outil d'usinage sur l'ébauche [KOR 85].

En 1953, des recherches menées au MIT¹ conduisent au développement d'une nouvelle technologie de machines numériques adaptées à des opérations précises et répétées. Le concept du robot industriel est breveté en 1954. Ce brevet décrit la réalisation d'un bras mécanique asservi capable d'effectuer des tâches à caractère industriel. En 1958, Planet Corporation (USA) combine avec succès cette technologie avec la technologie des télémanipulateurs développée pour l'industrie nucléaire américaine et crée le premier robot manipulateur industriel. La société Unimation voit le jour peu après, et livre le premier « Unimate » à General Motors en 1961. Vers la fin des années 70, ces robots dits « de première génération » se généralisent à l'ensemble de la production industrielle. Pendant que se développe ce nouveau concept « d'usine automatique », la robotique aborde d'autres domaines.

Ainsi, l'Union Soviétique réussit à téléopérer un robot mobile sur la Lune en 1971. En 1976, la sonde « Viking I » de la NASA² se pose sur la planète Mars, équipée d'un bras manipulateur téléopéré depuis la terre afin de prélever des échantillons de sol et de rochers [FRE 93], la mission *Mars Pathfinder* avec le robot « sojourner » en 1997 ou encore la mission *Mars Exploration Rovers* avec les deux robots jumeaux « Spirit et Opportunity » en 2004.

2.2. La téléopération

Dans cette partie, nous présentons quelques concepts de base et quelques problèmes de fond liés à la téléopération.

La Téléopération désigne les principes et les techniques qui permettent à l'opérateur humain d'accomplir une tâche à distance, à l'aide d'un système robotique d'intervention (dispositif esclave), commandé à partir d'une station de contrôle (dispositif maître), par l'intermédiaire d'un canal de télécommunication (figure 1.1).

¹ Massachusetts Institute of Technology-USA

² National Aeronautics and Space Agency

Elle a pris ses origines dans le besoin de prolonger le geste de l'homme au delà de la main, et se poursuit par l'ambition de se trouver là ou on ne se trouve pas (Téléprésence) comme illustré dans la figure 1.2.

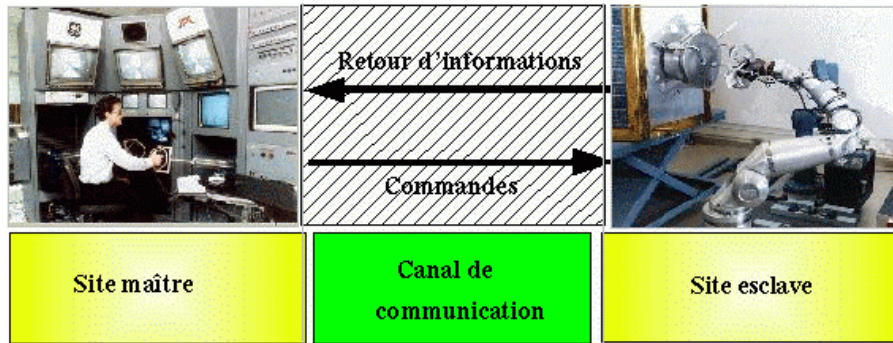


Figure 1.1. Illustration de l'architecture générale d'un système de Téléopération

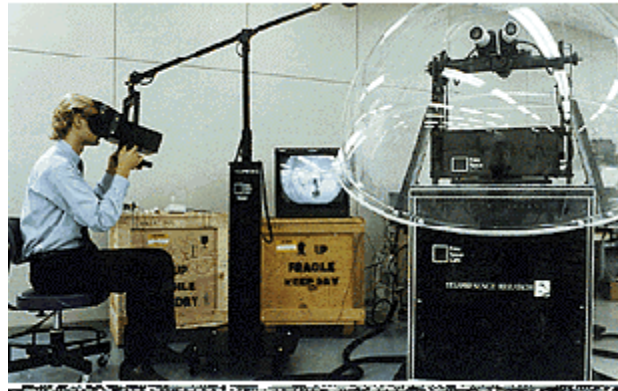


Figure 1.2. Illustration d'un système de téléprésence avec un robot mobile (Image du groupe de recherche en téléprésence : California Corporation Telepresence Research)

De nos jours, la téléopération s'applique aussi bien aux bras redondants, aux préhenseurs mécaniques polyarticulés, et à diverses sortes de robot mobiles à roues, et à pattes. Cependant, un certain nombre de problèmes de fond et complexes existent encore. Nous citerons par exemple, l'inévitable problème de délai dû au canal de transmission entre les deux sites, maître et esclave qui implique un retard de transmission d'informations sensorielles utiles à l'opérateur. En effet tout retard de transmission entraîne des instabilités difficilement compensables [FER 65], [BEJ 90] et [SHE 93]. D'autres problèmes qui ne cessent de préoccuper l'esprit de

nombreux chercheurs dans ce domaine concernent le choix d'un système de commande universel [BEJ 92] ainsi que la compréhension de nos propres sous-systèmes sensoriels [LED 94].

Parmi les problèmes de la téléopération, nous présentons brièvement ceux évoqués et détaillés dans les deux ouvrages « téléopération et télérobotique » [COI 02] et « téléopération et réalité virtuelle » [KHE 02] à savoir :

- les délais (retards) de transmission ;
- la réalisation d'une transparence idéale ;
- la prise en compte du facteur humain et sécurité ;
- l'autonomie et partage de commande.

Nous résumons dans ce qui suit les problèmes liés aux retards de transmission.

De nombreuses recherches ont été réalisées pour l'étude et l'analyse du problème de délai de transmission en téléopération. Deux approches ont été utilisées afin d'analyser ce problème. La première est basée sur l'automatique classique et la seconde est basée sur la théorie des lignes et de la passivité. La première approche, est de nature compensatoire, l'idée était d'introduire des correcteurs dans la boucle d'asservissement afin de compenser les systèmes à retards [DEL 93]. La seconde approche, considère le retard comme subi, c'est à dire comme partie intégrante du système [SPO 93] et [AND 97]. Malheureusement, ces deux approches exigent que le délai de transmission soit connu, alors que la majorité des protocoles publics actuels de transmission de données informatique ne garantissent pas la constance des délais de transmission. En effet indépendamment de la taille des données transmises, le délai peut varier d'une manière très aléatoire pour certains protocoles de transmission (par exemple Internet). Les travaux de Kosuge et son équipe [KOS 96] ont montré que ce problème entraîne une instabilité même si les variations de délai sont relativement petites.

Dans les systèmes de téléopération originels, l'opérateur doit impérativement subir un apprentissage qui peut être long avant d'obtenir une bonne adaptation et une bonne maîtrise du système de téléopération. En plus l'adaptation obtenue peut ne pas être adéquate pour une autre architecture. La sophistication et le nombre important d'applications téléopérées engendre une augmentation de la charge de travail de l'opérateur, sa fatigue et ce qui entraîne une diminution de ses performances et augmente ainsi les risques d'erreurs de téléopération.

L'évolution de l'informatique et des supports de télécommunication numérique est à l'origine de l'évolution de la téléopération. Grâce à eux, les robots esclaves ont pu être déportés à des distances considérables [VER 84]. En effet, initialement l'opérateur commandait le robot esclave dans un niveau assez bas, les trajectoires

issues des actions désirées sont envoyées directement via le dispositif maître. Le retour d'information (Images, force de contact, etc.) se fait directement vers l'opérateur. Mais malheureusement, cette approche n'a pas duré très longtemps, car les chercheurs se sont vite rendus compte de la nécessité d'exploiter les possibilités que peuvent offrir des ordinateurs pour apporter une assistance à l'opérateur. Depuis, plusieurs approches et concepts ont été proposés pour améliorer et faire évoluer les systèmes de téléopération. Nous pouvons résumer le classement des différentes approches (détaillées dans [COI 02] et [KHE 02]) représentant les modes d'interaction homme-machine que l'on retrouve généralement dans la plupart des systèmes de téléopération :

– la Téléopération Assistée par Ordinateur – TAO : Elle est vue comme une voie intermédiaire entre la téléopération originelle bas niveau et la supervision. L'objectif de la TAO est de réaliser à chaque instant et pour toute étape de la tâche, une exploitation optimale des ressources d'un ordinateur. La TAO bénéficie actuellement de l'utilisation de la réalité virtuelle et augmentée ;

– la Téléopération à Désignation d'Objectif (supervisée) – TDO : Dans ce mode, l'opérateur est plutôt vu comme un superviseur. L'intervention de l'opérateur se limite dans ce cas à la désignation d'objectifs qui seront réalisés par le robot ;

– la Téléopération Semi Autonome – TSA : La plupart des systèmes de téléopération actuels, s'orientent vers l'utilisation des deux concepts précédents (TAO et TDO). En effet ils tentent de moderniser la téléopération par une meilleure exploitation simultanée de l'autonomie du robot et des capacités de l'opérateur.

Nous pouvons résumer dans la figure 1.3, le classement de ces trois concepts selon le degré d'autonomie du dispositif esclave.

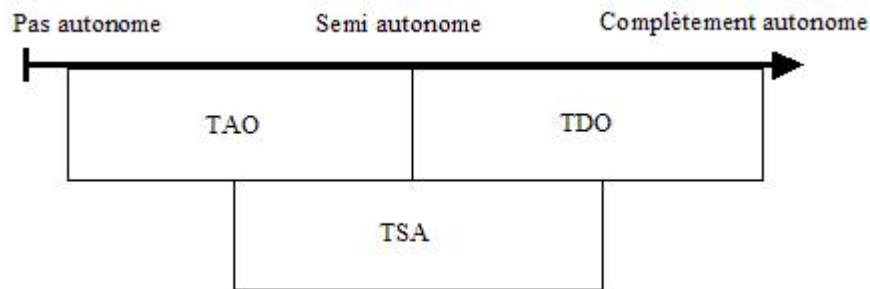


Figure 1.3. Classement de la TAO, TDO et TSA selon le degré d'autonomie du dispositif esclave.

2.3. La télérobotique

La télérobotique est une forme de téléopération lorsque l'opérateur réalise des tâches à distance en utilisant un robot. Ce dernier peut fonctionner d'une façon autonome. Elle s'applique dans le cadre de la TDO.

La télérobotique résulte en fait de la fusion des deux domaines originellement séparés qui sont la téléopération et la robotique. En effet, la robotique autonome n'étant pas encore tout à fait au point, le robot doit présentement être opéré à distance par un opérateur humain. On doit donc tenir compte des principes développés en téléopération. Cependant, comme le robot peut exécuter des tâches élémentaires de façon autonome, on parle de télérobotique plutôt que de téléopération. La télérobotique trouve des applications partout où l'homme a des difficultés à travailler directement (milieu hostile, lointain, trop grand ou trop petit) et où les tâches sont suffisamment complexes ou imprévisibles pour rendre difficile une automatisation complète. La condition principale de développement de la télérobotique est sa capacité à concurrencer l'intervention directe d'un homme ou l'utilisation d'un système automatique très spécialisé. Dans le premier cas, l'atout de la télérobotique est tout d'abord le remplacement d'un travail humain pénible ou dangereux par un autre, plus sûr et confortable. Dans le second cas il faut montrer l'intérêt d'un matériel plus versatile que le système automatique dédié à l'application envisagée.

2.4. Quelques domaines d'application

2.4.1. Le domaine nucléaire

Le nucléaire a été le premier domaine à stimuler le développement de systèmes de télérobotique. L'industrie nucléaire s'intéresse généralement aux applications suivantes :

- la manipulation de produits radioactifs : elle se fait en cellule spécialisée, dans laquelle des télémanipulateurs mécaniques sont utilisés pour amener et retirer le produit. L'opérateur travaille en vision directe et il n'y a pas de problèmes d'éloignement. L'introduction de la télérobotique n'est pas encore envisagée dans ce type d'application.

- la maintenance des installations : ce type de tâche est essentiellement réalisée par des machines spécialisées. Ces dernières offrent l'avantage d'être parfaitement adaptées à la tâche. Par contre leur mise en œuvre est longue et elles ne sont pas

adaptées aux changements de situation et ne peuvent être réutilisées dans d'autres tâches. La télérobotique est en train de trouver sa place suite aux recherches menées ces dernières années.

– le démantèlement d'installation et l'intervention suite à un incident : l'utilisation des systèmes télérobotique est une voie en cours de recherche concernant ces deux domaines. L'exploitation des nouvelles technologies comme la réalité virtuelle/augmentée est un atout favorable pour la poursuite de ces recherches. La figure 1.4 illustre l'utilisation d'un système de télérobotique du CEA³ pour le démantèlement d'installation et l'intervention dans le milieu nucléaire.

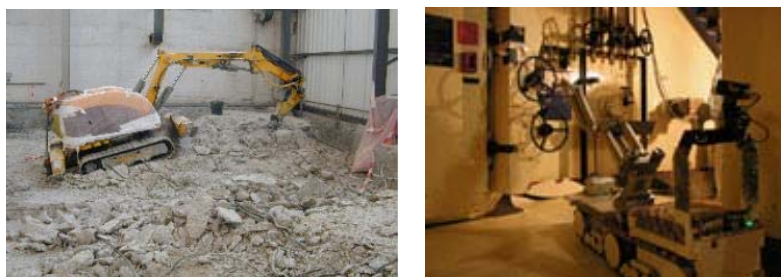


Figure 1.4. Illustration de la télérobotique dans le domaine nucléaire : A gauche, le démantèlement d'installation, à droite, l'intervention pour actionner des vannes (images CEA).

2.4.2. Le domaine spatial

Les principales applications de la télérobotique dans ce domaine sont l'exploration (figure 1.5), la maintenance de satellites et de stations spatiales orbitales. L'éloignement du site de travail et l'important temps de transmission des informations, impliquent l'utilisation de robots ayant une grande autonomie (basée sur une architecture complexe et intégrant de nombreux capteurs) sans pour autant exclure la possibilité de les téléopérer (la mission « *Mars Pathfinder* » avec le robot « sojourner » en 1997 sur la planète Mars en est un exemple).

Un autre exemple est la mission « *Mars Exploration Rovers* » avec les deux robots jumeaux « Spirit et Opportunity » en 2004 sur la planète Mars. En effet, en janvier 2004, deux grands robots d'exploration équipés d'éléments scientifiques perfectionnés se sont posés sur le sol martien et explorent la surface de la planète à la recherche de preuves supplémentaires sur la présence d'eau liquide sur Mars dans un lointain passé. Cette mission est la plus sophistiquée jamais envoyée vers la planète rouge par la NASA.

³ CEA : Commissariat à l'Énergie Atomique

Les objectifs scientifiques de la mission *Mars Exploration Rovers* se concentrent autour de deux points forts :

- déterminer l'histoire du lieu d'atterrissage (son climat, sa géologie etc..) ;
- faire une série de mesures sur le terrain exploré.

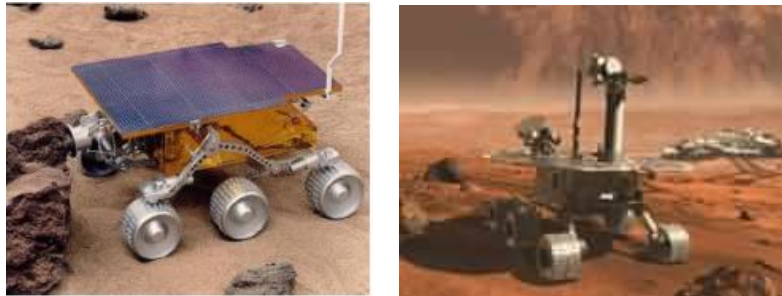


Figure 1.5. Illustration de la télérobotique dans le domaine spatial : A gauche, la mission «Mars Pathfinder» avec le robot sojourner en 1997, à droite, la mission «Mars ExplorationRovers» avec les deux robots jumeaux Spirit et Opportunity en 2004.(image JPL⁴)

Deux catégories d'application peuvent être distinguées dans le domaine spatial [DEL 02] :

- application dans l'espace proche : désigne les orbites basses sur lesquelles une présence d'astronautes peut être assurée temporairement grâce à la navette spatiale ou de façon prolongée à bord d'une station orbitale.
- applications dans l'espace lointain, exploration du système solaire : ce sont des applications à caractère exclusivement scientifique et ont pour objectif d'améliorer la connaissance du système solaire.

⁴ Jet Propulsion Laboratory-NASA

Catégorie d'application	Tâches
Espace proche	<ul style="list-style-type: none">- Capture de véhicules spatiaux- Déplacement et positionnement de masses importantes- Déplacement et positionnement d'un astronaute- Maintenance de la station spatiale, etc.
Espace lointain, exploration du système solaire	<ul style="list-style-type: none">- Approcher un instrument d'une zone à analyser- Prélever des échantillons du sol pour les analyser au retour sur Terre.

Tableau 1.1. Synthèse de quelques tâches réalisées en fonction des deux catégories d'application.

2.4.3. Le domaine militaire

La télérobotique intervient pour la désactivation de mines, l'observation de territoires ennemis ainsi que la télécommande d'engins tels que les chars, les avions et les hélicoptères.

En raison de la complexité du milieu terrestre, l'apparition de robots autonomes au sein du système de combat n'est pas encore d'actualité. En revanche, la téléopération de plate-formes robotisées permet dès aujourd'hui d'assister l'homme dans certaines tâches pénibles ou en milieu hostile. Dans cette optique, Giat Industries⁵ développe des technologies en matière de téléopération au combat afin de permettre aux combattants de poursuivre leur mission malgré les risques d'agression.

L'armée de terre imagine, dès à présent, ce que sera le combat de contact de demain autour du concept de bulle opérationnelle aéroterrestre (BOA). Giat Industries en partenariat avec Thales et EADS, travaille actuellement sur des projets de démonstrateurs visant à préparer cette nouvelle génération de blindés. Le groupe étudie notamment la mise en œuvre de drones et de robots téléopérés à partir de plate-formes de combat pour des missions d'acquisition.

⁵ Dossier Giat Industries : la téléopération sur tous les fronts (<http://www.giat-industries.fr/asp/fr/dossier.asp>)



Figure 1.6. La télérobotique dans le domaine militaire, à gauche, Le char démineur AMX 30 B2 DT, à droite, illustration du concept de la bulle opérationnelle aéroterrestre :BOA (image Giat Industries)

2.4.4. Le domaine sous-marin

A l'exception des applications militaires, les applications civiles sont principalement liées à l'industrie de l'offshore, l'inspection, la construction et la maintenance de conduites, structures, câbles sous-marins voire aussi des investigations scientifiques (épaves, espèces marines, etc.). Des bras manipulateurs embarqués à bord de véhicules peuvent être autonomes ou même téléopérés (figure 1.6). Ce domaine continue à être le principal domaine d'activité en nombre de systèmes de télérobotique.



Figure 1.7. Exemple d'utilisation d'un robot embarqué sur un véhicule sous marin, à gauche image du sous marin JASON [SAY 95], à droite, image du sous marin expérimental VORTEX développé par l'Ifremer⁶ de Toulon.

⁶ Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer

2.4.5. Le domaine médical et l'aide aux personnes handicapées

Le domaine d'aide aux personnes handicapées est extrêmement riche de possibilités. De nombreux projets ont été étudiés et mis en œuvre afin d'aider des handicapés à mieux vivre. On peut citer par exemple le projet SPARTACUS [GAL 89] et le projet MASTER du CEA [CAM 94] ont permis l'automatisation de quelques tâches quotidiennes à partir d'une commande utilisant les mobilités disponibles de l'handicapé. L'aide aux personnes handicapées moteur se développe depuis quelques années. La robotique mobile peut y apporter sa contribution. Défini en lien avec l'Association Française contre les Myopathies (AFM), Le projet ARPH⁷ [HOP 01] a comme objectif d'embarquer un bras manipulateur sur une base mobile autonome pour donner aux personnes handicapées la possibilité de réaliser seules des tâches de la vie quotidienne, soit dans son environnement proche en vision directe, soit dans un environnement plus lointain en vision indirecte (en mode de téléopération) [RYB 02]

Les médecins et les chirurgiens, utilisent de plus en plus de robots afin de les assister ou même de les remplacer dans certaines tâches. La téléchirurgie (figure 1.6) semble avoir un avenir prometteur, en particulier dans la chirurgie oculaire, qui réclame une grande précision et une sécurité extrême [GRA 93] et [HUN 94]. D'autres applications ont été trouvées en chirurgie mini invasive. En effet, de plus en plus d'interventions se pratiquent sous endoscopie. L'accès aux organes à opérer se fait par de petites incisions à travers lesquelles le chirurgien fait passer les instruments. Les exemples les plus connus de robots téléopérés sont sans doute les robots **Da Vinci** fourni par Intuitive Surgical⁸ et **Zeus** de Computer Motion⁹. Ils sont décrits en particulier dans l'état de l'art de la thèse de A. Krupa [KRU 03].

Da Vinci (Figure 1.8) est un système restituant au chirurgien une intuitivité des mouvements proche de celle des interventions ouvertes. Il est constitué d'un robot équipé d'un bras portant un endoscope stéréoscopique et de deux bras instrumentés [GUT 00]. Ces derniers sont asservis aux deux bras maîtres de la console de commande d'où téléopère le chirurgien. Celui-ci visualise l'intérieur du patient en relief grâce à l'endoscope stéréo.

⁷ Assistance Robotique aux Personnes Handicapées – (projet du LSC/EVRY)

⁸ <http://www.intuitivesurgical.com/>

⁹ <http://www.computermotion.com/>



Figure 1.8. *Le système Da Vinci : de gauche à droite, la console maître, le détail de l'interface de commande, les manipulateurs esclaves.*

Le concept de télé-opération mise en œuvre sur Da Vinci a été développé à l'extrême avec Zeus (Figure 1.9). En effet, en septembre 2001, le professeur Marescaux (IRCAD¹⁰) a téléopéré ce système depuis New York en réalisant avec succès une cholécystectomie (ablation de la vésicule biliaire) sur une patiente hospitalisée à Strasbourg. Cette première opération transatlantique baptisée « Opération Lindbergh », fut réalisable grâce à l'utilisation d'un réseau de communication à haut débit de France Télécom (10 mégabits/seconde). Le délai entre le geste du chirurgien sur la console maître et le retour visuel des mouvements des manipulateurs a pu être réduit à 150 ms [GHO 02].

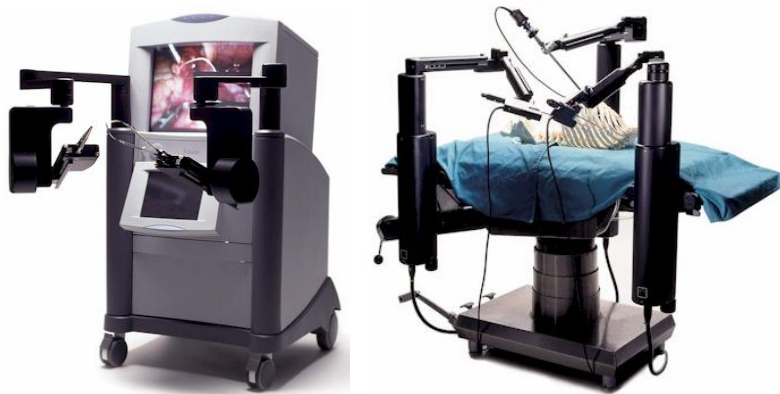


Figure 1.9. *Le système Zeus : à gauche la console de commande avec les bras maître, à droite, les manipulateurs esclaves.*

¹⁰ Institut de Recherche contre les Cancres de l'Appareil Digestif, Strasbourg, France

Nous noterons que l'évolution des systèmes de téléopération est étroitement liée à l'évolution des technologies de communication et de l'interactions homme-machine. Nous nous intéressons tout particulièrement aux technologies de la Réalité Virtuelle (RV) et de la Réalité Augmentée (RA) qui ont été rapidement adoptées au profit de la téléopération.

3. Internet et les environnements télérobotiques

La téléopération consiste à commander et à manipulation des systèmes robotiques, à distance. Ce mode de contrôle permet d'effectuer des tâches complexes, voire impossibles pour l'homme. En effet, la téléopération permet aussi d'effectuer des interventions en milieu hostile, que des manipulations basiques connues et maîtrisées par l'homme. Les domaines d'application de la téléopération sont très variés et touchent la plupart des domaines de recherche (recherche médicale, spatial etc.). Ces domaines sont présentés dans le chapitre « domaines d'application de la téléopération, réalité virtuelle et augmentée »

Les systèmes de télérobotique sont traditionnellement implantés en utilisant des canaux de communication dédiés. Le déplacement du site esclave et/ou du site maître nécessite le déplacement du matériel ainsi que la reconfiguration réseau du canal de communication reliant ces deux sites. Les personnes sont obligées de se déplacer sur le site client (centre de contrôle afin de travailler et de préparer les missions). De plus si la machine cliente tombe en panne il devient difficile ou très coûteux de poursuivre la mission puisqu'il s'agit d'une machine dédiée où se trouve l'interface homme machine.

Cependant la télérobotique basée sur Internet, permet une délocalisation facile des opérateurs à faible coût, et ne dépend pas de l'endroit où se trouve le matériel qui permet de contrôler le robot qui, lui, se trouve sur le site esclave généralement distant. Cette idée a été exploitée par la NASA lors de la préparation de la mission *sojourner* sur Mars. Initialement les scientifiques étaient obligés de se déplacer jusqu'au centre de contrôle en Californie afin de travailler et de contrôler le robot. Le développement d'une interface Internet [BAC 98], a donné la possibilité aux scientifiques de travailler et de collaborer ensemble pour contrôler le robot de n'importe où dans le monde. Cet exemple montre une des possibilités que peut offrir le télétravail via Internet.

Les premiers sites Internet de la télérobotique sur le Web ont été créés en 1994 par l'américain Goldberg [GOL 95] et l'Australien Taylor [TAY 95]. Depuis de

nombreux travaux ont eu lieu autour du contrôle de systèmes mécaniques (robots, caméras, machines de productique, etc.) connectés sur l'internet. Nous pouvons citer, sans vouloir être exhaustif, Telegarden [GOL 96], PumaPaint [STE 98], ARITI [OTM 00a], KhepOnTheWeb [SAU 00], les travaux du LISYC¹¹ [LEP 02], du LIRMM¹² [FRA 03], de l'INSA¹³ de Lyon [LEL 03], du CRAN¹⁴ [GNA 03], etc. Depuis que la télérobotique via Internet a vue le jour, un recensement des systèmes fonctionnels a été effectué afin de centraliser l'ensemble des systèmes de télé-contrôle via Internet. En effet, du site Internet de la NASA¹⁵ a recensé 26 projets dont un Français (celui du système ARITI¹⁶) jusqu'à 1999, le projet australien *Teledlabs project*¹⁷ a recensé une soixantaine de sites Internet de télé-contrôle dans le monde en mai 2005.

Dans ce qui suit, nous présentons quelques systèmes de téléopération via le réseau Internet qui sont encore fonctionnels et nous proposons de les classer selon les deux catégories de systèmes à savoir : les systèmes de téléopération non collaboratifs et les systèmes de téléopération multi-utilisateurs qui proposent une collaboration (via un système de vote) des utilisateurs pour réaliser une tâche soit par le robot, soit par un autre utilisateur distant.

3.1. Les systèmes de téléopération non collaboratifs

3.1.1. Australia's Telerobot on the Web¹⁸

Le bras manipulateur [TAY 95] et [TAY 97] (de type ASEA IRB) permet de manipuler à distance des objets. L'utilisateur envoie la position et l'orientation de la pince axe par axe pour la placer à côté de l'objet. Il peut contrôler l'ouverture et la fermeture de la pince. Deux caméras vidéo sont utilisées pour permettre à l'utilisateur de bien placer la pince et de manipuler l'objet. Par contre il est difficile de positionner la pince et de manipuler l'objet. Ceci nécessite une grande concentration et un bon entraînement de la part de l'utilisateur. L'interface de télé-contrôle du robot australien a subi de nombreuses améliorations de puis 1996 à ce jour. La figure 1.4 présente la dernière version de l'interface de télé-contrôle.

¹¹ Laboratoire d'Informatique des SYstèmes Complexes – Université de Brest

¹² Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier

¹³ Institut National des Sciences Appliquées

¹⁴ Centre de Recherche en Automatique de Nancy

¹⁵ http://ranier.oact.hq.nasa.gov/telerobotics_page/realrobots.html.

¹⁶ <http://lsc.univ-evry.fr/Projets/ARITI/>. depuis 1998 sur le site Internet du LSC et depuis 1999 sur le site Internet de la NASA.

¹⁷ <http://telerobot.mech.uwa.edu.au/links.html>

¹⁸ <http://telerobot.mech.uwa.edu.au/>

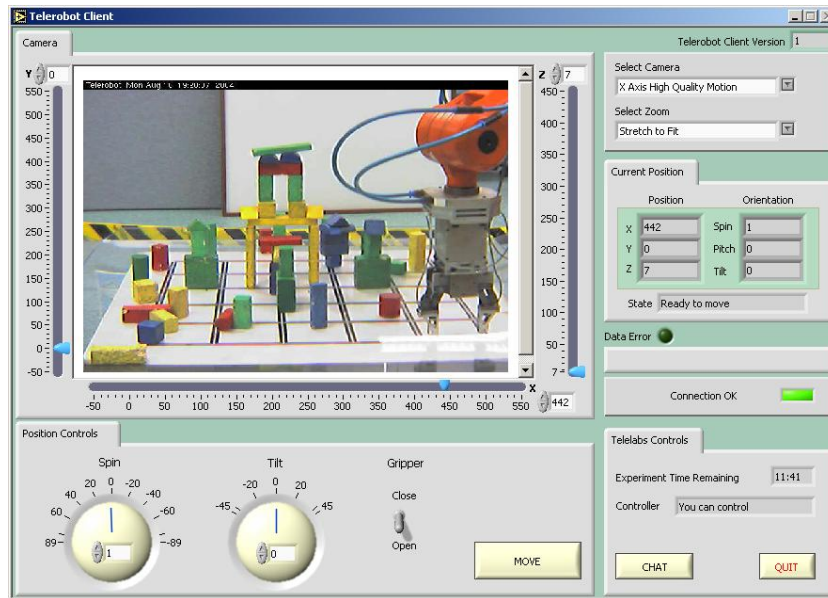


Figure 1.4. Interface client du système de télé-contrôle du robot australien.

3.1.2. PumaPaint project¹⁹

Le bras manipulateur PUMA 760 [STE 98] et [COR 04] est capable de reproduire un dessin réalisé par un utilisateur depuis une interface (figure 1.5) de dessin dédiée (qui ressemble à celle de ``paintbrush sous windows". Il existe 4 couleurs (rouge, vert, bleu et jaune) et un pinceau pour chaque couleur. Suivant la couleur et la trajectoire dessinée, le bras manipulateur va prendre le bon pinceau et reproduire la trajectoire réalisée par l'utilisateur. Après chaque tâche l'utilisateur peut visualiser le résultat en choisissant une des deux caméras dédiées pour ce retour vidéo.

Pas de retour vidéo pendant la réalisation de la tâche. Le système supporte un seul utilisateur à chaque fois.

¹⁹ <http://pumapaint.rwu.edu/>



Figure 1.5. Interface client du système PumaPaint.

3.1.3. Projet E-productique

Dans le travail de [LEP 04], une architecture logicielle pour l'e-productique : SATURNE pour « Software Architecture for Teleoperation over an Unpredictable Network » a été proposée. Elle repose sur un noyau de services de communication autour duquel gravitent des modules spécifiques aux machines visées. La prise en compte des aléas du réseau est réalisée à l'aide d'un capteur logiciel affichant ses informations, sous une forme statique et dynamique à l'utilisateur, et dont les valeurs peuvent être utilisées pour une gestion de type mode de marche.

Plusieurs applications ont été construites autour de SATURNE. La première machine pilotée²⁰ a été une caméra de type SONY EVID-31. Equipée d'un socle motorisé, elle peut effectuer des mouvements de rotation horizontale sur 200° et verticale sur 120°. Elle est de plus pourvue d'une focale variable. Dès 1999, elle a été mise en œuvre et rendue accessible sur l'internet. L'interface de contrôle (figure 1.6) contient une image statique de la scène. Elle est désignable et permet donc

²⁰ <http://similimi.univ-brest.fr>

l'orientation de la caméra en fonction de ce que l'utilisateur souhaite regarder. L'utilisateur a la possibilité aussi de régler le facteur de zoom et les boutons prédéfinis peuvent permettre la visualisation de lieux précis.

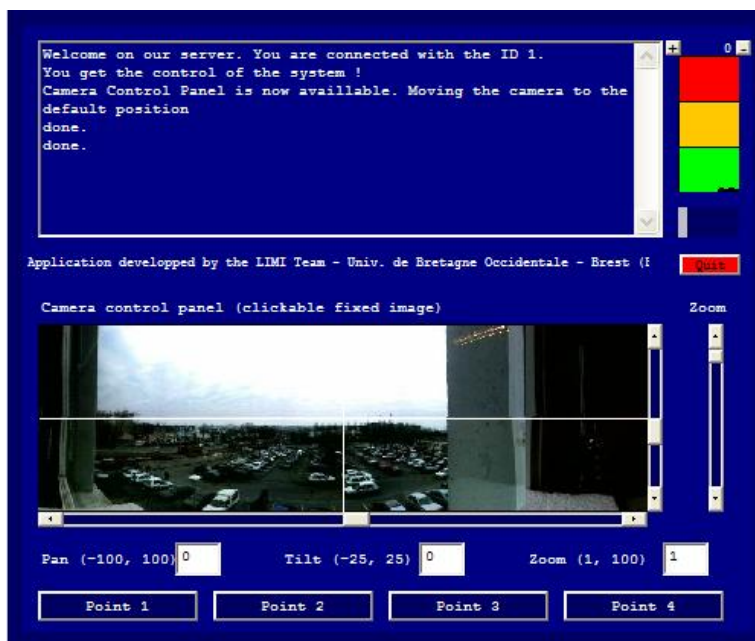


Figure 1.6. Interface client du système de contrôle de la caméra vidéo.

La deuxième application consiste en la commande d'un bras manipulateur à cinq degrés de liberté de type Ericc permettant la saisie et le déplacement de petits objets. Il est connecté au serveur par une liaison série RS232 et ses mouvements sont filmés en permanence par deux caméras. La première est à focale variable placée en face du robot. La deuxième est fixe et fournit une image vue du dessus. L'utilisateur peut contrôler le robot à travers une applet de contrôle similaire à celle de la caméra SONY sauf qu'elle intègre une partie pour le contrôle du robot. Ce système ne supporte qu'un seul utilisateur à la fois.

3.1.4. Le système ARITI

Le système ARITI [OTM 00a], est un système de téléopération permettant le contrôle d'un robot, et utilisant les techniques de la réalité augmentée. La figure 1.7 présente l'interface utilisateur de ce système. ARITI (Augmented Reality Interface for Teleoperation via Internet) constitue un système expérimental de téléopération

via l'Internet, il est le premier système en France de téléopération en réalité augmentée via Internet ARITI²¹ (développé au LSC en 1998 et référencé sur le site web de la NASA²² depuis 1999).

Au-delà de la réalisation technique, les apports de ARITI résident dans la mise en œuvre d'assistances à l'opérateur humain pour la perception de la scène, la supervision des tâches et le contrôle du robot notamment par l'insertion de guides virtuels actifs [Otmame00b].

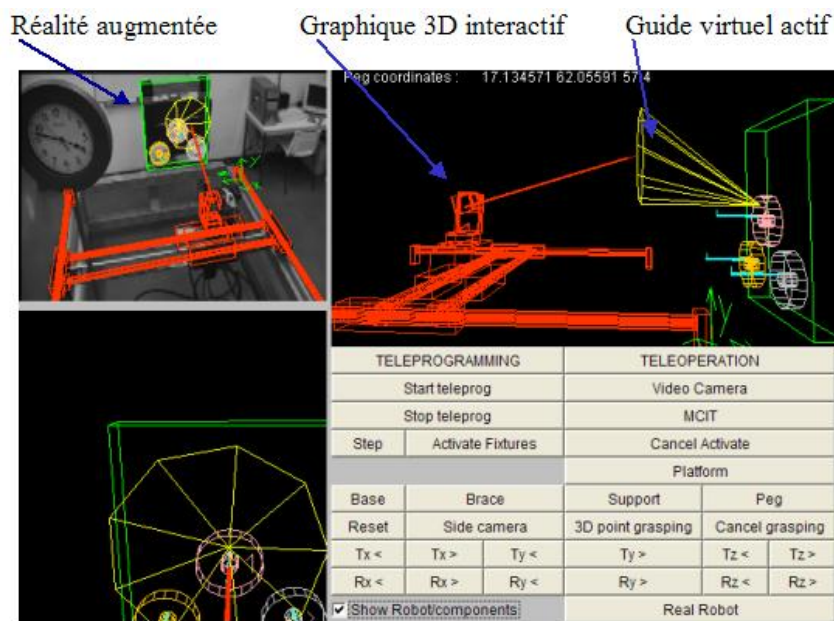


Figure 1.7. Interface utilisateur du système ARITI

L'interface utilisateur du système ARITI (figure 1.7) contient quatre zones. Dans la zone de réalité augmentée (la zone en haut à gauche), un robot virtuelle est superposé sur le robot réel pour permettre à l'utilisateur de commander d'abord le robot virtuel et après validation, il va contrôler le robot réel (retour prédictif). A l'aide du tableau de bord (la zone en bas à droite), l'utilisateur peut choisir son mode de contrôle (téléprogrammation ou téléopération), d'activer ou pas les guides virtuels, etc. Les deux dernières zones (la zone en haut à droite et celle en bas à

²¹ <http://lsc.univ-evry.fr/Projets/ARITI/>

²² http://ranier.oact.hq.nasa.gov/telerobotics_page/realrobots.html

gauche) permettent de donner à l'utilisateur d'autres points de vue de l'environnement virtuel pour lui faciliter la manipulation du robot.

3.2. Vers la téléopération collaborative via Internet

Dans ce qui suit, nous présentons brièvement les deux systèmes fonctionnels qui s'orientent vers la téléopération collaborative via Internet. En effet, il s'agit de systèmes supportant une interaction multi-utilisateur pour commander soit un robot soit guider un opérateur humain.

3.2.1. Projet Ouidja 2000

Le projet Ouidja 2000 [GOL 00], représenté sur la figure 1.8, présente la première fois la possibilité de rajouter à la notion de téléopération, celle de travail collaboratif. Le robot, muni d'une caméra, permet aux différents utilisateurs de visualiser une planche Ouidja. La planche Ouidja, est une planche en bois marquée de l'alphabet ainsi que par des mots court comme OUI, NON ou encore AU REVOIR. Utilisée normalement lors des séances de spiritisme, elle est utilisée dans ce projet dans un but de téléopération collaborative.

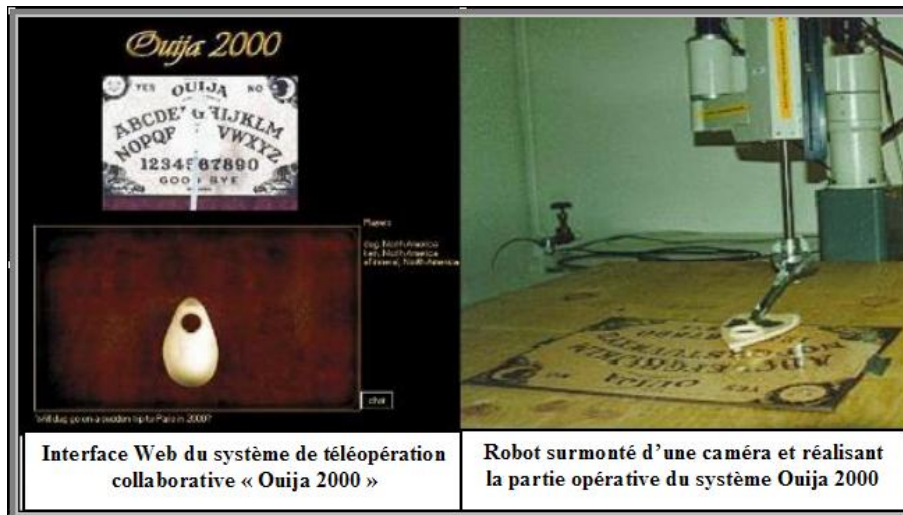


Figure 1.8. Système Ouidja 2000

Ce projet permet donc à plusieurs utilisateurs de répondre à une question commune, en positionnant leur souris sur la réponse qu'ils croient exacte. Les choix des différents utilisateurs correspondent alors, à la trajectoire de la souris. Tous les choix sont ainsi pris en compte, pour une décision commune dans le mouvement final du robot.

3.2.2. Le système Tele-Actor

Le système Tele-Actor [GOL 01], [GOL 02] et [GOL 04], développé par le même laboratoire que le projet Ouija 2000, permet de prendre en compte les décisions de plusieurs opérateurs, et ce via un système de vote (figure 1.9). La partie physique d'un tel système est alors assurée par un humain, qui se charge, en fonction de la décision finale issue du système de vote, d'effectuer la tâche qui lui incombe.

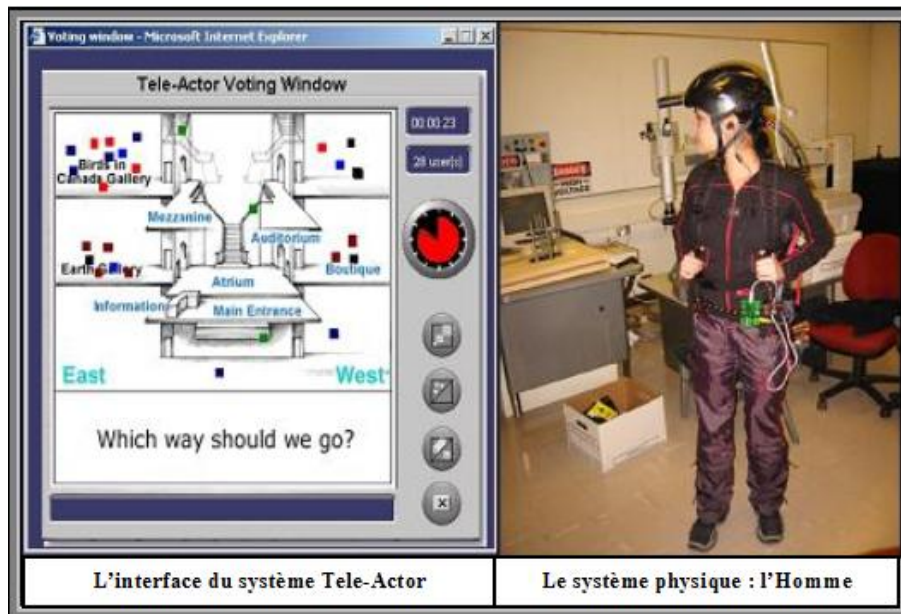


Figure 1.9. Système Tele-Actor

L'étude que nous avons effectuée, nous a permis de remarquer la constante amélioration des systèmes de téléopération. Nous avons également constaté la croissance du nombre de systèmes téléopérés via Internet. Ceci a créé un nouveau besoin qui est celui de faire travailler plusieurs personnes distantes sur un même site, et depuis nous assistons à l'émergence de quelques systèmes dits multi-

utilisateurs. Avec de tels systèmes, la téléopération collaborative via Internet, commençait à se poser le problème de la téléopération distribuée. Les deux systèmes présentés (Ouija 2000 et Tele-actor) sont basés sur la prise en compte des votes des utilisateurs pour générer soit une commande commune (qui sera exécutée par le robot) soit une décision commune sur la tâche que va réaliser un opérateur distant. Cependant, la collaboration au sens des collecticiels n'est pas vraiment exploitée afin de permettre une réelle collaboration entre les utilisateurs. Grâce aux efforts menés en intelligence artificielle pour modéliser le travail collaboratif et grâce aussi à l'amélioration de la puissance des ordinateurs, ce type de système commence à voir le jour.

Afin de permettre une téléopération collaborative via Internet le développement de collecticiels adaptés pour la téléopération est nécessaire. C'est dans cet objectif que les travaux menés par Samir Otmane et N. Khezami [KHE 05] ont permis la réalisation d'un collecticiel pour la téléopération collaborative via Internet. Nous présentons brièvement l'architecture logicielle et l'interface homme-machine du collecticiel ARITI-C²³.

4. ARITI-C : Un collecticiel pour la téléopération collaborative via internet

La problématique de la téléopération collaborative via Internet doit prendre en compte les exigences du domaine de la téléopération via Internet d'une part, et des exigences du domaine du TCAO d'autre part. En effet, Il s'agit de trouver un bon compromis entre la flexibilité que doivent offrir des collecticiels et la garantie de réaliser une mission de téléopération qui nécessite de l'assistance à l'opérateur et de la sécurité dans le déroulement de la tâche.

En conséquence, un collecticiel pour la téléopération collaborative via Internet doit :

- supporter un travail collaboratif ;
- assister et superviser les utilisateurs pendant le déroulement de la mission ;
- permettre l'analyse et l'évaluation de la collaboration au sein d'un groupe et/ou de l'ensemble des groupes ;
- permettre la réalisation des tâches d'une manière synchrone (temps réel) et/ou asynchrone (temps différé) en fonction de la mission ;

²³ une version collaborative du système ARITI. ARITI-C est opérationnelle depuis juillet 2005 sur <http://lsc.univ-evry.fr/ARITI/>

Afin de répondre à cette problématique, deux domaines de recherches ont été explorés : le domaine du TCAO et le domaine des Systèmes Multi-Agents (SMA). Les études menées dans le domaine des SMA ont deux objectifs. Le premier consiste à présenter les différents concepts, propriétés et formalismes des SMA utiles pour la modélisation des systèmes complexes et distribués. Le second objectif vise à établir un bilan des plates-formes de développement multi agents pouvant être utilisées pour l'implémentation de tels systèmes. Dans le domaine du TCAO, l'étude présentée a comme objectifs de tenter de répondre aux questions suivantes : Quelle définition peut-on attribuer au terme collaboration? Comment peut-on modéliser la téléopération collaborative et quel modèle d'architecture logicielle faut-il utiliser ?

Dans le domaine des SMA, le formalisme d'agent proposé par Ferber [FER 97] ainsi que la plateforme de développement JADE²⁴ ont été retenus et utilisés. Dans le domaine du TCAO, nous avons retenu le concept du trèfle fonctionnel des collecticiels [ELL 91] pour la modélisation de la collaboration ainsi que le principe du modèle d'architecture PAC* [CAL 97] pour la conception de l'architecture logicielle du collecticiel.

4.1. Architecture logicielle de ARITI-C

4.1.1. Un système multi-agents pour la téléopération collaborative

Les différentes recherches effectuées ont permis de proposer un système multi agents pour la collaboration (SMA-C) [KHE 05a] qui satisfait les exigences de la téléopération via Internet [KHE 05b]. Le système proposé a pour objectif d'aider à la collaboration ainsi qu'à la résolution des conflits qui en résultent. L'utilisation des agents permet d'instaurer un environnement flexible (agents capables de répondre à temps, proactifs, communicants) dans le but de l'exécution ordonnée et concluante des tâches jusqu'à la terminaison de la mission. Le SMA-C défini est composé de quatre types d'agents (figure 1.10): les agents qui permettent de choisir une mission, appelés les *agents communication*, les agents qui permettent de planifier les actions à exécuter, appelés les *agents coordination*, les agents qui exécutent les actions choisies, appelés les *agents production*, et les agents qui permettent d'assurer la communication inter agents, appelés les *agents collaboration*. Chaque instance de ces quatre agents est regroupée sous un super agent, appelé l'Agent Collaborateur

²⁴ Java Agent DEvelopment Framwork – une plate-forme de développement multi-agent en Java. Elle est conforme aux spécifications de la FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents).

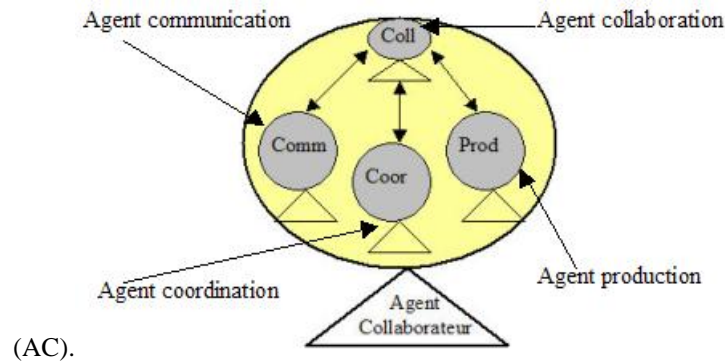


Figure 1.10. Description de l'agent collaborateur.

Dans ce modèle d'architecture, un agent collaborateur interagit avec ses correspondants du système par l'intermédiaire de son agent collaboration et de ses agents dédiés (communication, coordination et production). L'avantage majeur de ce modèle d'architecture est l'utilisation de l'agent collaboration qui joue un double rôle. D'une part, il assure la liaison entre les différents agents du monde considéré et d'autre part il est vu comme une interface entre l'utilisateur et l'agent collaborateur.

Nous pouvons résumer le rôle fonctionnel de chacun des quatre agents de la façon suivante :

Agent collaboration : L'agent collaboration assure deux fonctions principales. D'une part, il permet la communication entre les trois agents dédiés de l'agent collaborateur et d'autre part, il établit une interaction directe entre chaque agent dédié avec son correspondant d'un autre agent collaborateur, ceci leur permet de communiquer ensemble sans l'intervention de l'agent collaboration. Cette communication directe entre les agents dédiés, d'un même agent collaborateur, et avec leurs correspondants des autres agents collaborateurs, permet d'augmenter l'efficacité du système de communication. Cela permet d'éviter l'effet du goulot d'étranglement dû à la centralisation. En fait, les messages envoyés par les différents agents ne concernent pas seulement la communication. Le seul moyen d'interaction des agents entre eux dans notre système est l'envoi des messages. Par conséquent, les messages de communication de bas niveau (inter agents) sont échangés entre les agents durant toutes les phases de la collaboration ;

Agent communication : L'agent communication décide si une mission peut être accomplie ou pas, et c'est donc lui qui décide si la collaboration peut avoir lieu. Par conséquent, l'agent communication est la pierre angulaire de l'agent collaborateur. L'agent communication détermine l'état de l'agent en fonction des perceptions qu'il

reçoit et de son état antérieur. Cet agent gère toutes les informations qui lui sont communiquées. Ces informations représentent les différentes perceptions qu'il peut recevoir de l'extérieur, comme celles émises par l'agent collaboration.

Agent coordination : L'agent coordination définit toutes les actions que l'agent peut accomplir suite au choix de la mission de l'agent communication. L'agent coordination reçoit un ensemble d'informations qui lui sont envoyées par les autres agents coordination ou par l'agent collaboration. Cet ensemble regroupe les différentes perceptions du monde reçues par celui-ci ainsi que les informations qui lui sont envoyées par l'agent collaboration.

Agent production : L'agent production se charge de l'exécution des actions issues de la collaboration des différents agents du système. Ces actions, sont envoyés par l'agent collaboration. L'agent production reçoit les informations qui lui sont envoyées par l'agent collaboration.

Le SMA-C est implémenté sous l'environnement de développement JADE et ces performances sont également évaluées [KHE 05c]. Ce SMA-C est représenté techniquement sous forme d'un serveur multi agents qui intercepte les différentes interactions (connexion, communication, coordination, production, etc.) des utilisateurs afin de les traiter. Un agent collaborateur est créé par un agent générique pour chaque client (figure 1.11).

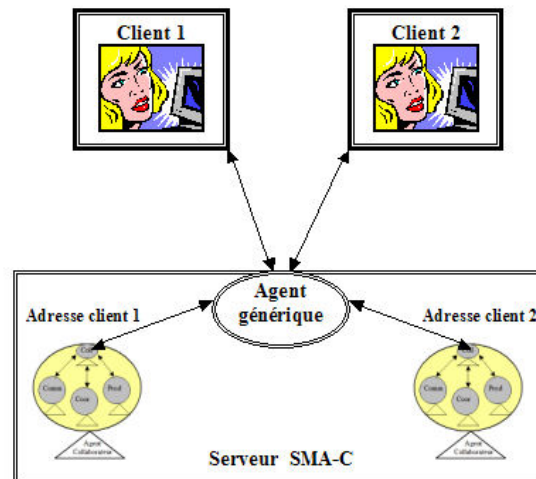


Figure 1.11. Exemple de deux agents collaborateurs générés lorsque deux clients sont connectés.

Il s'agit d'utiliser le SMA-C développé pour proposer un collecticiel permettant un travail collaboratif avec le système ARITI. Ce collecticiel consiste à rendre possible le travail en commun de plusieurs personnes distantes sur une même mission effectuée par un même robot, la bonne coordination des tâches étant assurée par le SMA-C. La figure 1.12 illustre la transformation du système mono-utilisateur ARITI en un système multi-utilisateur collaboratif ARITI-C. Chaque utilisateur qui se connecte à ARITI-C via Internet peut collaborer avec d'autres utilisateurs connectés de part le monde pour contrôler le robot réel. Il peut, également, discuter avec eux ou tout simplement les superviser. Un utilisateur peut, s'il le souhaite, allumer ou éteindre la lumière à distance.

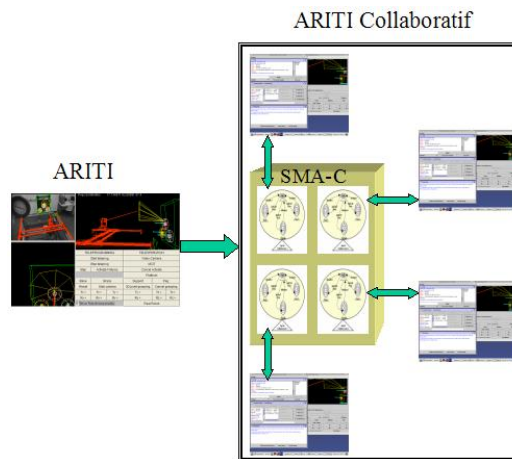


Figure 1.12. Illustration de la transformation de ARITI en ARITI-C.

Dans ce qui suit nous appelons "utilisateur" l'acteur humain et "client" le client d'un serveur informatique.

4.1.2. Architecture générale

Faisant intervenir différents matériels en parallèle (robot, caméra vidéo, boîtier de contrôle de la lumière), l'ancienne version du système ARITI est constituée de trois serveurs et de trois clients. Il s'agit des clients/serveurs vidéo, commande (pour contrôler le robot réel) et lumière (pour allumer et éteindre la lumière à distance).

Dans le système ARITI-C, un agent générateur crée les agents collaborateurs à la demande et, de part son rôle de chef d'orchestre, c'est lui l'agent idéal pour gérer le fonctionnement global du système : enregistrement d'événements, vérification

d'identité, etc. Comme il ne peut y avoir qu'un seul client pour la commande du robot à un instant donné, c'est également cet agent générateur, unique, qui va jouer ce rôle de client commande, centralisant et répercutant les commandes envoyées par les divers utilisateurs. Enfin, un Système de Gestion de Bases de Données (SGBD) récupère les informations diverses recueillies lors de la collaboration. Les clients d'ARITI-C sont des clients réseau pour :

- l'agent générateur, qui les identifie, leur fournit des informations diverses et crée leurs agents collaborateurs quand le besoin est soulevé ;
- l'agent communication, qui sert de relais de discussion (chat) au sein d'un groupe. Il sert également à choisir une mission. Le choix de la mission fait partie de la communication car c'est l'utilisateur maître qui choisit la mission, elle sera ensuite transmise aux autres utilisateurs. Donc, durant le choix de la mission il n'y a aucune coordination entre les utilisateurs et c'est pour cela que cette tâche fait partie de la communication et non pas de la coordination ;
- l'agent coordination, qui sert à répartir les actions pour une mission choisie ;
- l'agent production, qui concerne l'utilisation du robot réel pour l'utilisateur en manipulation, et le suivi des manipulations (supervision) pour les autres ;
- le serveur vidéo et le serveur lumière ;

L'architecture résultante est décrite en figure 1.13. Pour des raisons de lisibilité de la figure, les autres agents (agent collaboration qui ne communique pas directement avec le client) ne sont pas représentés dans le runtime (moteur d'exécution) de JADE.

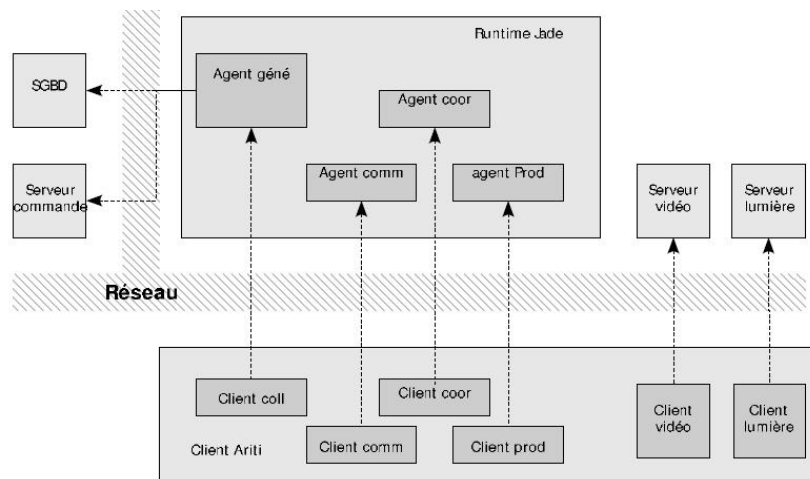


Figure 1.13. Architecture client-serveur simplifiée du système ARITI-C.

4.2. Interface homme-machine de ARITI-C

Nous présentons brièvement les trois interfaces de ARITI-C, la première décrit l'interface principale du système ARITI-C, la seconde présente l'interface de collaboration et la dernière présente l'interface d'analyse et d'évaluation des missions de téléopération collaborative. Des informations complémentaires sur le système ARITI-C et sur les différentes interfaces utilisées sont disponibles sur le site Internet du projet ARITI²⁵.

4.2.1. Interface principale

L'interface principale de ARITI-C (figure 1.14) est décomposée en 3 vues et un panel de contrôle. Le panel de contrôle est constitué d'onglets correspondants à diverses fonctionnalités et d'un bouton « connexion » destiné à ouvrir l'interface de collaboration. La vue en haut à gauche est le retour vidéo du robot réel sur laquelle est superposée le robot virtuel. La vue en haut à droite est paramétrable, par défaut elle affiche une vue de côté de l'environnement virtuel. Enfin la vue en bas à gauche est une vue de l'environnement du point de vue de l'effecteur du robot.

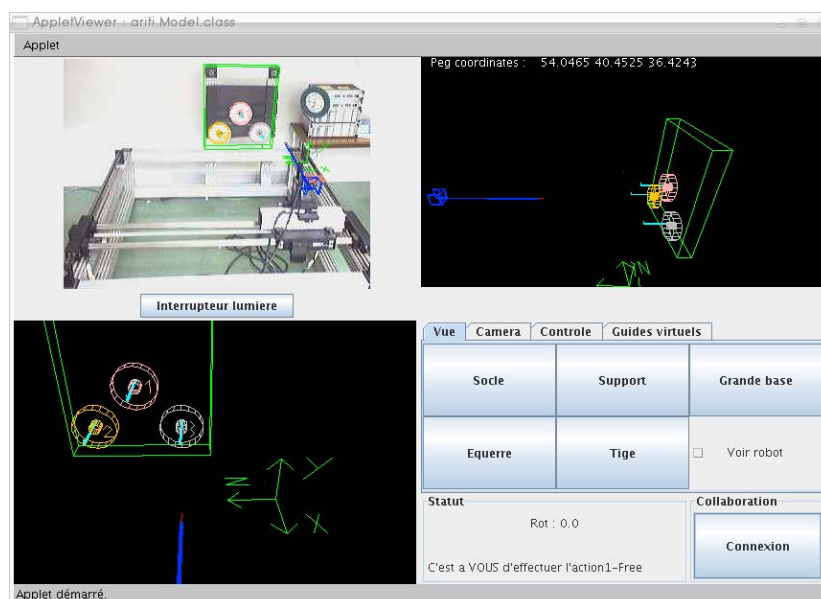


Figure 1.14. Interface principale de ARITI-C avec ses 3 vues et son panel de contrôle.

²⁵ <http://lsc.univ-evry.fr/ARITI/>

Le premier onglet (Vue), activé par défaut, est celui qui permet de sélectionner la partie du robot que l'on souhaite contrôler (socle, support, grande base, etc.). Le second onglet (Caméra) offre le contrôle du point de vue de la caméra virtuelle (en haut à droite de l'interface) et permet également de lancer l'interface de télé-calibration de la caméra (figure 1.15 à gauche). Le troisième onglet (Contrôle) permet de contrôler le robot en production et le dernier (Guides virtuels) permet de lancer l'interface de création de guides (figure 1.15 à droite).

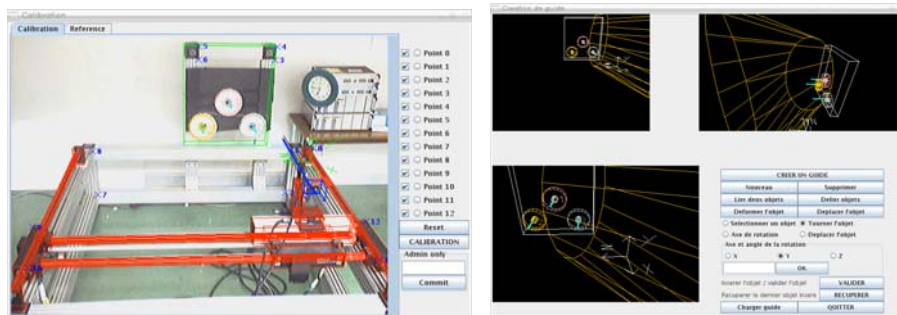


Figure 1.15. Interface de télé-calibration de la caméra, à gauche, et l'interface de création de guides virtuels, à droite.

4.2.2. Interface de collaboration

Dans cette partie, nous présentons l'interface homme-machine utilisée pour la téléopération collaborative [KHE 05d] à travers une manipulation-type faisant intervenir deux utilisateurs pour une mission de saisie-dépôt. Cette interface est lancée sur demande d'un utilisateur (en sélectionnant le bouton connexion de l'interface principale de la figure 1.14). Nous résumons les principales fonctionnalités de cette interface.

Enregistrement : Tout utilisateur du système ARITI-C doit être connu. Pour cela une fenêtre s'affiche dès la connexion d'un utilisateur, lui demandant de préciser son identifiant et son mot de passe ainsi que le pseudonyme sous lequel il veut être connu des autres usagers.

Discussion et création du groupe : Le premier élément d'interface apparaissant après la connexion au serveur de collaboration est l'interface de discussion (chat). Cette interface reprend certaines caractéristiques des classiques clients IRC. Par défaut, le premier utilisateur connecté est maître de session (représenté par PremierTesteur dans la figure 1.16) : il compose le groupe et valide ses choix. Il peut également exclure des utilisateurs.



Figure 1.16. Interface de collaboration pendant la phase de discussion et de création de groupe (deux utilisateurs sont connectés : PremierTesteur et SecondTesteur).

Communication et coordination : Une fois le groupe constitué, chaque membre a une nouvelle interface qui apparaît, constituée d'une zone de discussion intra-groupe et d'une liste de missions (figure 1.17 à gauche). Une fois la mission choisie, les utilisateurs vont procéder à la planification de leurs tâches en choisissant les actions qu'ils souhaitent réaliser (figure 1.17 à droite).

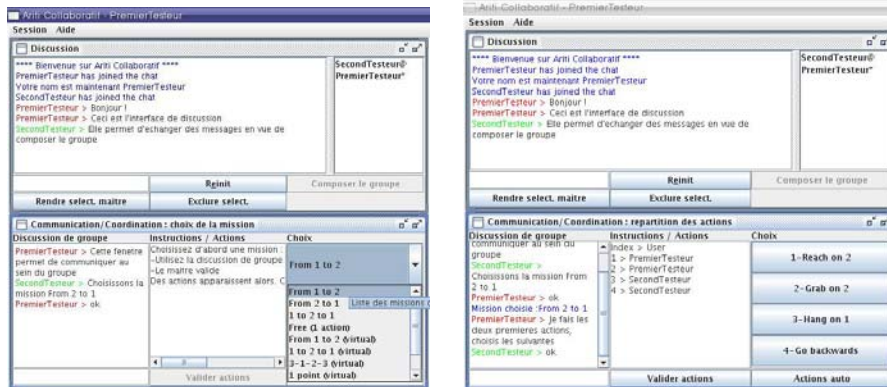


Figure 1.17. Interface de collaboration : à gauche, pendant la phase de choix de la mission, à droite pendant la phase de planification des tâches (de coordination).

Production : Le passage en production est accompagné de l'ouverture d'une dernière fenêtre dans l'interface (figure 1.18 en bas). Celle-ci affiche le statut de la production (qui fait quoi ?). Une liste permet d'activer ou non les guides virtuels, un bouton permet d'automatiser la tâche (en missions de saisie / dépôt seulement).

Dans le cadre des missions de saisie / dépôt, la production se déroule au niveau de l'interface principale. En utilisant le panel de contrôle du robot ou les raccourcis clavier. D'un côté un utilisateur contrôle le robot virtuel, avec l'assistance des guides virtuels et un autre utilisateur peut superviser les actions de l'autre utilisateur. Enfin, une fois toutes les actions terminées, un message invite le maître à réinitialiser la session.

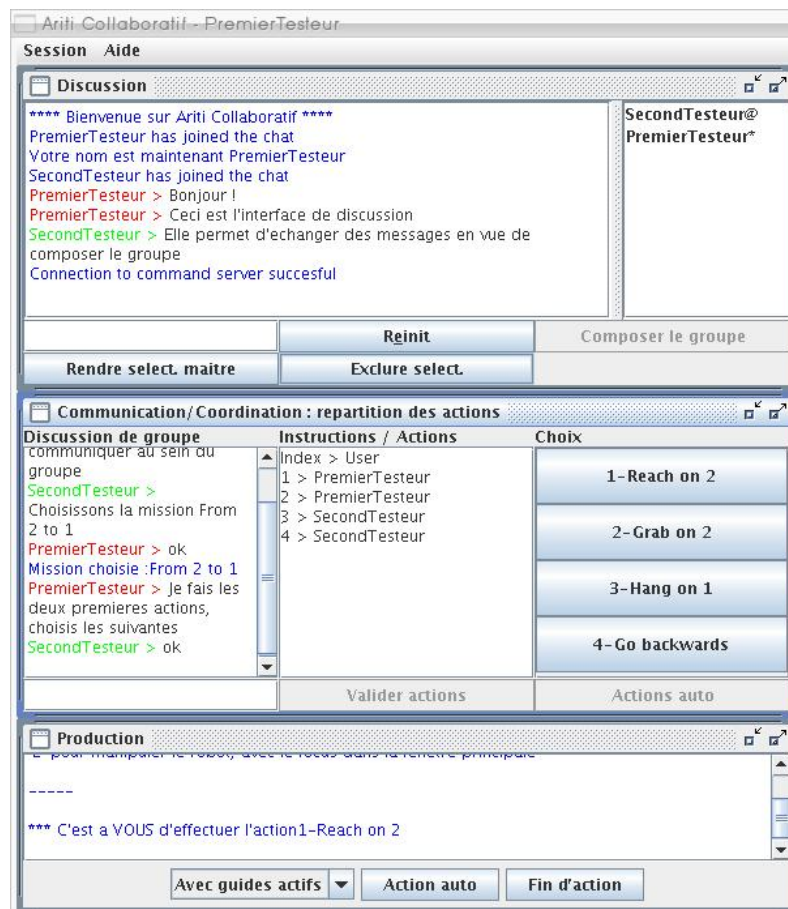


Figure 1.18. Interface de collaboration pendant la phase de production : en bas, un message est envoyé à l'utilisateur « PremierTesteur » lui précisant d'effectuer une action.

Le système ARITI-C sait gérer une poignée d'actions servant de briques de base à la composition des missions. Nous présentons ci-dessous les diverses actions gérées, regroupées par thématiques :

Les missions de saisie / dépôt : Ces missions sont les différentes étapes permettant de déplacer un objet (cylindrique) d'un crochet (support) à un autre. Elles peuvent être réelles (le robot réel est asservi au robot virtuel) ou simplement virtuelles (manipulation du robot virtuel uniquement). Nous présentons brièvement les différentes étapes de ce type de mission :

- atteindre un objet 1 ou 2 ou 3 : Ces actions consistent à amener l'effecteur au contact du premier objet sur le crochet 1 ou 2 ou 3 ;
- saisir l'objet 1 ou 2 ou 3: Ces missions consistent à retirer du crochet 1 ou 2 ou 3 l'objet préalablement atteint ;
- déposer l'objet sur le crochet 1 ou 2 ou 3 : Ces missions consistent à déposer un objet saisi sur le crochet 1 ou 2 ou 3 ;
- reculer le robot : Ces missions consistent à éloigner l'effecteur des crochets, pour se préparer à une nouvelle manipulation.

La figure 1.19 présente les captures d'écran d'une mission de saisie/dépôt en virtuel d'un objet : (A) atteindre l'objet 1, (B) saisir l'objet 1 du cochet 1, (C) déposer l'objet 1 sur le crochet 3) et (D) reculer le robot.

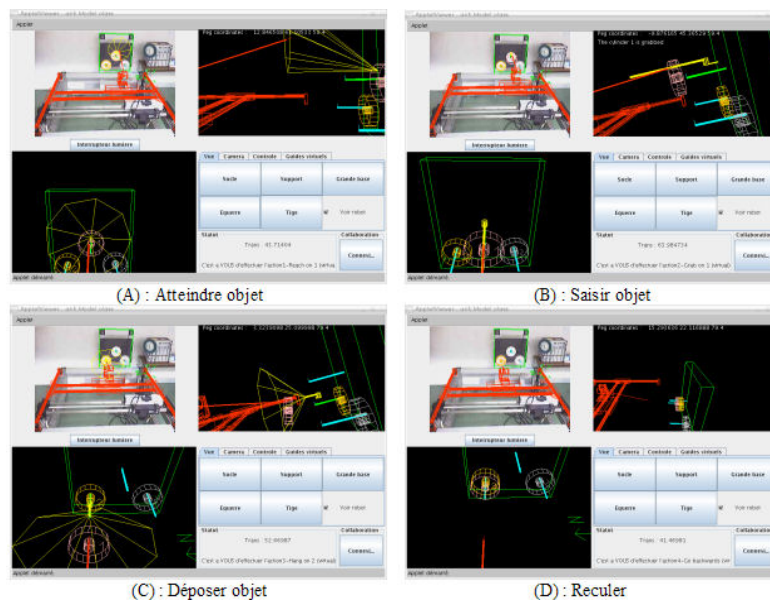


Figure 1.19. Capture d'écran d'une mission de saisie/dépôt d'un objet en virtuel.

Les missions de création collaborative de guides virtuels : Chaque utilisateur peut créer et manipuler des guides virtuels (métaphores graphiques) dans son environnement de création. Les guides créés et modifiés par un utilisateur donné sont visibles et manipulables par tous. La fin de l'action est déterminée quand le maître décide d'insérer les guides dans l'environnement. Les espaces de création de guides sont alors vidés et les guides virtuels sont insérés dans l'environnement d'ARITI-C pour les utiliser.

Les missions d'atteinte d'un point 3D quelconque dans l'espace de l'environnement du robot : Cette mission consiste à atteindre un point 3D que l'utilisateur définit lui-même. En cliquant dans les deux vues virtuelles de l'interface principale, l'utilisateur désigne une droite (rayon visuel obtenu grâce à la connaissance du point de vue virtuel) dans chacune. Le point d'intersection de ces deux droites est visé. Un guide virtuel sous forme d'un cône permet de l'atteindre pourvu qu'il soit dans le domaine accessible au robot (figure 1.20).

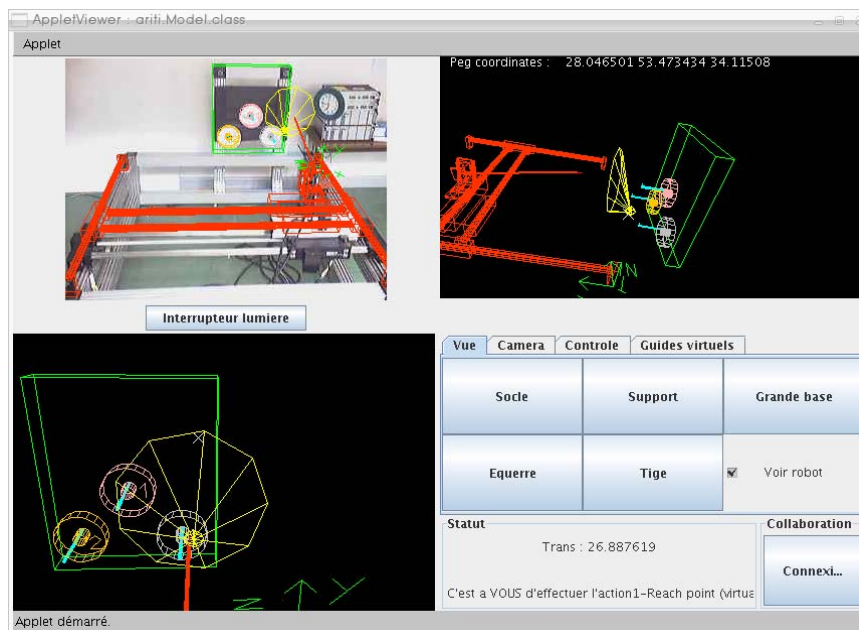


Figure 1.20. Capture d'écran d'une mission Atteindre un point 3D par le robot, un guide virtuel apparaît après désignation d'un point 3D par clics successifs dans les deux vues virtuelles.

4.2.3. Interface d'analyse et dévaluation de la collaboration

Dans cette partie nous présentons brièvement l'outil développé pour l'analyse et l'évaluation de la collaboration. Cet outil bénéficie de l'existence du système multi agents pour la collaboration (SMA-C) développé et intégré dans le système ARITI-C. En effet, le SMA-C offre une décomposition de la collaboration en trois espaces communication, coordination et production. A chaque utilisateur (client) est associé un agent collaborateur qui gère et assiste la collaboration de l'utilisateur avec les autres utilisateurs du même groupe.

Il s'agit d'une interface développée en PHP qui communique avec une base de données MySQL. Cette base de données est également utilisée par le SMA-C. La figure 1.21 illustre les interactions entre la base de données avec l'interface PHP et le SMA-C.

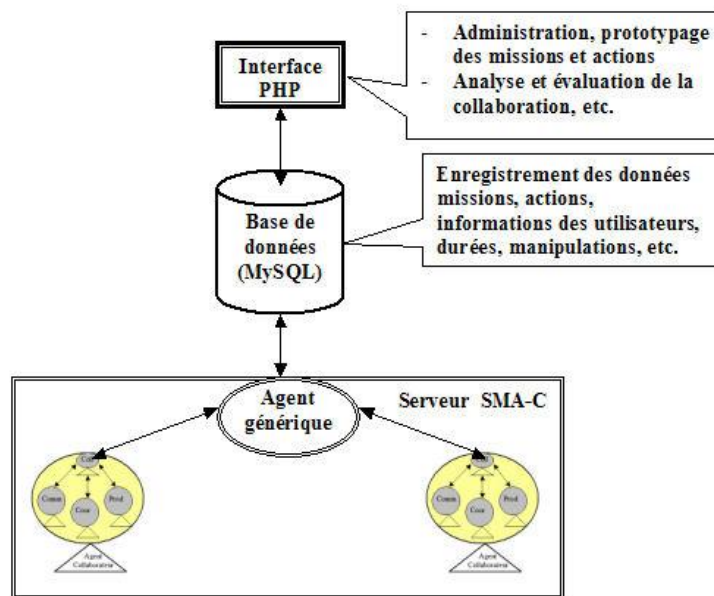


Figure 1.21. Illustration des interactions entre la base de données et l'interface PHP.

Cet interface permet également l'administration des différentes données utilisées ou générées par le SMA-C comme les informations sur les utilisateurs, les groupes, les connexions, les missions, les actions, les durées de chaque phase de

collaboration, etc. L'interface PHP développée propose de nombreuses possibilités pour l'administration de la base de données et l'analyse de la collaboration : modifier les tables, envoyer un mèl aux utilisateurs, modifier les missions et les actions, ajouter une mission, re-générer le fichier de calibration de la caméra, purger la base de données, exporter et restaurer la base de données, extraire les statistiques par utilisateur et par groupe (figure 1.22), etc.

Les données extraites pour l'analyse et l'évaluation de la collaboration sont les suivantes :

- la durée de chaque espace de la collaboration à chaque fois qu'une mission a été effectuée, ce qui permet de ressortir sa durée moyenne et son écart-type ;
- le nombre de messages échangés au sein du groupe :
 - classées chronologiquement et par groupe, ces données nous permettent de suivre l'évolution du groupe,
 - classées par mission, ces données nous permettent de qualifier la mission ;

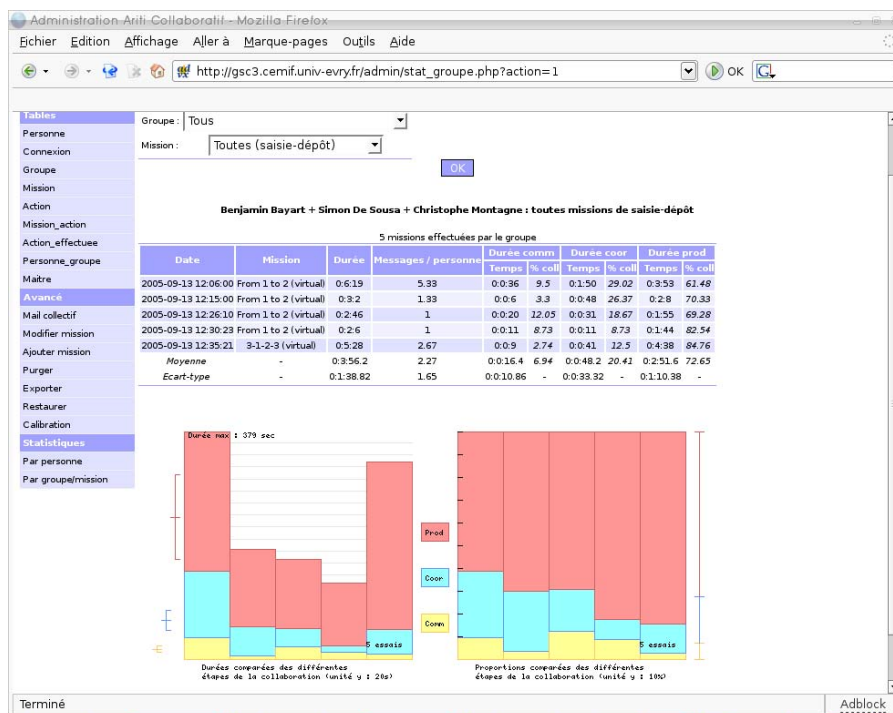


Figure 1.22. Capture d'écran de l'interface PHP développée pour l'administration, l'analyse et l'évaluation de la collaboration (les graphiques présentent des statistiques pour un groupe d'utilisateurs : en jaune, la durée de communication, en bleu, la durée de coordination et en rouge, la durée de production).

5. La téléopération assistée par la réalité virtuelle et la réalité augmentée

Dans ce qui suit nous présentons brièvement la réalité virtuelle et la réalité augmentée ainsi que les domaines d'application utilisant ces technologies. D'autres applications industrielles françaises sont également présentées dans le cadre du projet RNTL²⁶ PERF-RV²⁷ [FUC 03].

5.1. La Réalité Virtuelle (RV)

Bien que ce mot ne soit à la mode que depuis quelques années, la réalité virtuelle est née de recherches qui ont débuté dans les années cinquante dans des milieux aussi divers que les laboratoires de la NASA ou les studios d'Hollywood. Les pionniers de ce monde artificiel furent des visionnaires qui empruntèrent des techniques aussi variées que le cinéma, l'informatique, l'automatique et l'électronique, les briques de ce qui fût appelé la Réalité Virtuelle (RV).

5.1.1. Définition

Il existe autant de définitions qu'il y a de champs d'application de la RV. Les contraintes auxquelles doit faire face cette technologie sont nombreuses. Ce qui a provoqué de multiples définitions de la RV. Il n'existe cependant pas de consensus général sur une définition unique. Nous avons retenu trois définitions qui à nos yeux semblent couvrir le domaine de la RV :

– Définition d'un système de RV [BUR 93] : un système de réalité virtuelle est une interface qui implique la simulation en temps réel et des interactions via de multiples canaux sensoriels. Ces canaux sensoriels sont ceux de l'homme, vision, audition, toucher odorat et le goût.

– Définition fonctionnelle de la RV [FUC 03] : La réalité virtuelle va permettre de s'extraire de la réalité physique pour changer virtuellement de **temps**, de **lieu** et(ou) de type d'**interaction** : interaction avec un environnement simulant la réalité ou interaction avec un monde imaginaire ou symbolique.

– Définition technique de la RV [FUC 03]: La réalité virtuelle est un domaine scientifique et technique exploitant l'**informatique**²⁸ et des **interfaces comportementales**²⁹ en vue de simuler dans un **monde virtuel**³⁰ le comportement

²⁶ Réseau National des Technologies Logicielles

²⁷ Plateforme Française de Réalité Virtuelle : projet labellisé en 2000, financé par le ministère de la recherche pour une durée de trois ans.

²⁸ Potentialités matérielles et logicielles

²⁹ Interfaces matérielles de la RV

d'entités 3D, qui sont en **interaction en temps réel**³¹ entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion **pseudo-naturelle**³² par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs.

5.1.2. Synthèse des domaines d'application de la RV

Ci-dessous, une synthèse de quelques domaines d'application utilisant la RV :

– **architecture** : On peut créer des plans, imaginer des architectures de construction de cités, de villes, enfin grâce au virtuel on peut faire visiter une maison avant qu'elle ne soit construite. Ce procédé est surtout utilisé pour les handicapés. A l'aide d'une chaise roulante virtuelle, on peut vérifier s'il y aura un problème lors des déplacements à l'intérieur du bâtiment en question.

– **militaire** : Les militaires utilisent la RV pour plusieurs raisons comme : la simulation. Grâce à la RV, l'armée peut entraîner ses régiments pour des missions spécifiques ou bien pour les entraîner de façon générale. Nous avons eu la preuve de l'efficacité de la RV lors de la Guerre du Golf. Son efficacité a été clairement mise en évidence, puisque les pilotes ont pu s'entraîner durant des mois sur des simulateurs virtuels avec des données qui provenaient directement des satellites espions américains. A leur arrivée sur le champs de bataille, ils en connaissaient déjà tous les recoins.

– **divertissement** : C'est sans doute dans ce secteur que la RV est la plus exploitée à son état pur. Des jeux très réels dans un monde imaginaire où tout est permis. Les rêves les plus fous y sont autorisés. La majorité des jeux virtuels qui existent sont basés sur le principe de la simulation. Être dans un véhicule et le diriger au travers de différents environnements, en ressentir toutes les secousses. Les jeux virtuels font de plus en plus fureur.

– **enseignement** : L'apprentissage à l'aide des hypermédia entraîne une navigation non linéaire et interactive par l'usage d'un matériel éducatif qui atteint les sens de l'étudiant : vision, audition, toucher, odorat. Les ordinateurs pour les hypermédia, connectés aux réseaux internationaux à large bande, réalisent la plupart de l'enseignement interactif, plus spécialement l'enseignement des détails techniques dans les domaines de l'art, des affaires, de l'histoire, des langues, de la médecine, de la musique, des sciences. Les instructeurs donneront moins d'explications, parce que les meilleurs matériaux des meilleurs enseignants du monde sur presque n'importe quel sujet seront ajoutés aux présentations hypermédia de son propre professeur et sont disponibles sur simple appel à n'importe quel moment du jour et de la nuit quand les étudiants veulent apprendre.

³⁰ Interactif et en temps réel

³¹ Obtenue si l'utilisateur ne perçoit pas de décalage temporel (latence) entre son action sur l'environnement virtuel et la réponse sensorielle de ce dernier.

³² L'immersion ne peut être naturelle car nous avons appris à agir naturellement dans un monde réel.

– **télérobotique** : Utilisée pour des interventions dans des milieux hostiles tels que : l'intérieur d'une centrale nucléaire, les fonds sous-marin, l'intérieur d'un volcan, etc. C'est d'ailleurs ce principe qui a été utilisé lors des récentes missions spatiales sur la planète Mars. Grâce à la RV les techniciens peuvent s'entraîner à manipuler le robot, améliorer leurs réflexes en causant des fausses situations d'urgence ou de faux problèmes techniques. Ils peuvent aussi enregistrer une série de mouvements ou de tâches, que le robot devra faire, avant de les faire faire par le robot dans une situation réelle. Dans une opération de télérobotique la plupart des actions du robot sont préprogrammées. Lorsque le robot effectue ces phases préprogrammées, l'opérateur ne croise pas les doigts. Il doit superviser le robot durant l'accomplissement de sa tâche ou, dans certains cas, il doit assister le robot (téléassistance). Les techniques de RV en robotique sont susceptibles de remplir deux fonctions. La première est la simulation, qui permet à l'opérateur de s'entraîner (à manipuler le robot) et de programmer des tâches qui seront ensuite exécutées par le robot. La deuxième fonction est de servir d'interface entre l'opérateur et le robot au cours d'une mission, par laquelle l'opérateur peut manipuler le robot et l'assister.

– **chirurgie** : En chirurgie, la tendance est de réduire la taille de l'accès à la zone à opérer. L'objectif de cette tendance est de réduire le risque d'infection, la morbidité postopératoire et bien sûr le temps d'hospitalisation. Ces techniques se nomment vidéoscopie et endoscopie. Ces deux techniques fonctionnent très bien, mais la visibilité du chirurgien et l'accessibilité à la zone à opérer sont fortement réduites. Grâce à la RV, ce problème peut être enfin résolu. Ces techniques consistent à introduire une micro-caméra, qui transmet les images à un écran installé près de la table d'opération, par une petite incision et par une autre, introduire les instruments de chirurgie. Tout ceci pour effectuer l'acte chirurgical. La visibilité étant restreinte et le chirurgien étant privé du contact avec les organes, l'opération devient très difficile. À l'aide d'échographie, de scanographie ou d'imagerie par résonance magnétique nucléaire, il est possible de reconstituer la zone à opérer en une image tridimensionnelle visible à l'aide d'un système de RV. Le chirurgien a donc une meilleure visibilité et puisqu'il peut grossir l'image qu'il reçoit, il est même plus précis. Il faut comprendre que ce procédé est à un stade peu développé. Par ce fait, il ne peut pas être utilisé en pratique, il faut attendre encore quelques années avant que ce procédé n'atteigne sa maturité. Cette technique ne servira pas seulement à réduire le risque d'infection, la morbidité postopératoire, le temps d'hospitalisation et à augmenter la précision de l'acte chirurgical et la visibilité. Mais elle permettra à de jeunes chirurgiens de s'entraîner sur des modèles virtuels avant de pratiquer des opérations sur de vrais sujets.

Il faut noter qu'au début de l'apparition de la réalité virtuelle, on pensait que tous les domaines allaient être touchés et que beaucoup d'applications basées sur ce principe verraient le jour. Aujourd'hui, la tendance est de ne pas réaliser des applications purement virtuelles, mais, avec les méthodes de ces dernières, d'augmenter la perception des utilisateurs. Ce concept se nomme la réalité

augmentée. Dans ce cas, l'utilisateur n'est plus complètement immergé dans un monde non réel, mais des informations virtuelles, viennent renforcer sa perception de la réalité.

5.2. La Réalité Augmentée (RA)

5.2.1. Définition

La Réalité Augmentée (RA) peut être définie comme une combinaison de la vraie scène visualisée par l'utilisateur et d'une scène virtuelle produite par l'ordinateur.

D'une manière générale cette technique consiste à augmenter la scène réelle avec des informations virtuelles supplémentaires. Cette augmentation peut prendre différentes formes selon les domaines d'application. Pour résumer, Il existe deux façons d'utiliser la réalité augmentée :

- la réalité augmentée en vision indirecte : Augmenter ce qui est vue par un ou plusieurs capteurs³³ en superposant des informations virtuelles sur des retours d'information obtenus par ces capteurs. Par exemple, dans la partie droite de la figure 1.10, un retour vidéo d'un robot distant est augmenté par un modèle virtuel du robot que contrôle l'utilisateur en temps réel.

- la réalité augmentée en vision directe : Augmenter directement ce qui est vue par l'utilisateur en superposant des informations virtuelles sur la vue réelle de l'utilisateur. Ce type d'augmentation peut se faire soit via des dispositifs d'affichage de type *see-through*³⁴(figure 1.10 à gauche), soit par projection sur des surfaces (cas des surfaces augmentées).

³³ Capteurs vidéos ou autres

³⁴ Semi-transparents

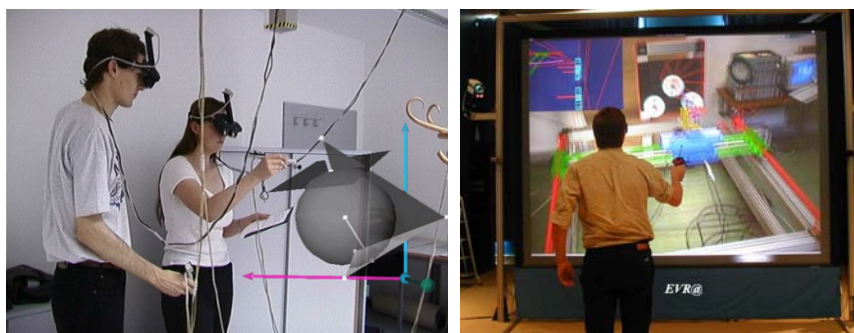


Figure 1.10. Illustration de la réalité augmentée : à gauche, en vision directe (image projet Studierstube³⁵), à droite, en vision indirecte (image projet ARITI³⁶ dans la salle EVR@³⁷)

la RA a aussi trouvé un essor dans le domaine de l'interaction homme-machine (IHM) et elle offre de nombreux avantages par rapport à des environnements de bureau numérique ou de RV [BIL 05]. Feiner [FEI 93] déclare « *Il y a beaucoup de situations pourtant dans lesquelles on souhaiterait pouvoir interagir avec notre environnement réel. La réalité augmentée permet de rendre cela possible en présentant un monde virtuel qui enrichit, au lieu de remplacer, le monde réel* ».

5.2.2. Synthèse des domaines d'application de la RA

Ci-dessous, une synthèse de quelques domaines d'application utilisant la RA :

- **médical** : L'utilisation des systèmes de la RA dans ce domaine est une voie très encouragée par de nombreux chercheurs. Généralement ce sont les opérations chirurgicales qui en profitent le plus. Par exemple, un robot est utilisé pour assister le neurochirurgien lors d'une opération chirurgicale sur un patient atteint d'une tumeur au cerveau. Des images sont transmises à l'ordinateur qui les traduit en 3D et durant l'opération, le cerveau virtuel est en permanence superposé à l'image du cerveau réel du patient. Cette superposition permet au système de guider le chirurgien jusqu'à la tumeur moyennant un rayon laser.

- **divertissement** : Une forme simple de la RA est utilisée pendant le journal de télévision. La plupart du temps le journaliste se trouve devant un fond bleu ou vert et cette image réelle est augmentée avec des images générées par ordinateur.

³⁵ <http://www.cg.tuwien.ac.at/research/vr/studierstube/vt/>

³⁶ Augmented Reality Interface for Teleoperation via Internet (<http://lsc.univ-evry.fr/Projets/ARITI>)

³⁷ Plateforme de télétravail en Environnement Virtuel et Augmentée du laboratoire IBISC (ex- LSC) de l'Université d'Evry

– **militaire** : Les militaires utilisent aussi des systèmes de RA où des informations s'affichent sur leur écran de pilotage, ou bien un viseur indiquant la cible à atteindre. On trouve également des systèmes distribués de simulation de guerre qui utilisent aussi des techniques de la RA.

– **conception, fabrication, entretien et réparation** : Quand les techniciens de maintenance se trouvent en face d'une nouvelle pièce qui ne leur est pas familière, au lieu de consulter de nombreux manuels, il peuvent utiliser un système de RA où l'affichage de l'équipement (pièce) peut être augmenté avec des informations pertinentes pour la réparation. Par exemple les composantes qui sont défectueuses vont clignoter sur l'écran facilitant ainsi la localisation donc la réparation.

– **robotique et télérobotique** : Comme nous l'avons mentionné au début de cette section, la RA est utilisée pour améliorer la perception visuelle ou encore anticiper une situation réelle et prévenir des cas dangereux. En effet, la superposition d'un modèle virtuel sur une image réelle est très utilisée en Téléopération. Le fait d'augmenter l'image vidéo avec un modèle en fil de fer par exemple, facilite la visualisation du monde 3D distant (généralement lorsque le site distant est visualisé par une seule caméra). Si l'opérateur désire effectuer un déplacement sur le robot réel, il peut le réaliser sur le robot virtuel (fil de fer) qui n'est rien d'autre qu'un rehaussement graphique du vrai robot. L'opérateur peut alors décider de l'exécution de la tâche après avoir vu le résultat de la simulation.

5. 3. La téléopération assistée par la réalité augmentée

Dans ce qui suit nous nous intéresserons exclusivement au domaine de la téléopération assistée par la réalité augmentée. Nous présenterons une synthèse de quelques systèmes de téléopération utilisant cette technologie. Pour ce qui concerne la téléopération assistée par la réalité virtuelle, l'ouvrage [KHE 02] présente les méthodes et des technologies utilisées.

Les systèmes de réalité augmentée pour la téléopération, consiste généralement à superposer un modèle virtuel sur une image réelle grâce à un mécanisme appelé la *calibration*³⁸.

Cette superposition du virtuel sur le réel est utilisée soit, pour faire de la visualisation prédictive, soit pour superviser des tâches en cours d'une mission. La visualisation prédictive est utilisé généralement en téléopération soit pour pallier le problème de délai [NOY 84] et [BEJ 90], soit pour rehausser l'image vidéo pour compenser ses défauts [MAL 92] et [OYA 92].

³⁸ Permet l'identification des paramètres (internes et externes) de la caméra réelle qui seront appliqués par la suite sur la caméra virtuelle afin de superposer les deux mondes virtuel et réel.

Ce principe de superposition a été utilisé, et adopté généralement par la plus part des laboratoires qui s'intéressent à la téléopération et à la supervision de missions de télérobotique, sans être exhaustif nous allons présenter brièvement certains travaux de quelques laboratoires :

– **Jet Propulsion Laboratory (JPL-NASA, USA)** : Cette équipe travaille sur un système permettant à l'opérateur de ne plus être tributaire du temps de propagation entre le site esclave et le site maître [KIM 93]. L'opérateur dispose dans le site maître d'une interface lui permettant de configurer le système, de gérer l'acquisition des données pertinentes et de visualiser en temps réel les forces et couples s'exerçant sur le bras. Une interface vidéo permet de gérer le retour d'information des caméras ainsi que la superposition à ces dernières des images synthétiques (prédicteurs graphiques, figure 1.10), dont certaines issues d'une base de données géométriques mise à jour en temps réel. Pour s'affranchir des temps de transfert des informations, l'image prédite du déroulement de la tâche est présentée à l'opérateur et recalée sur l'image réelle. La principale aide apportée à l'opérateur est visuelle et lui permet d'avoir une estimation de la distance et de l'orientation de l'effecteur par rapport à la cible.

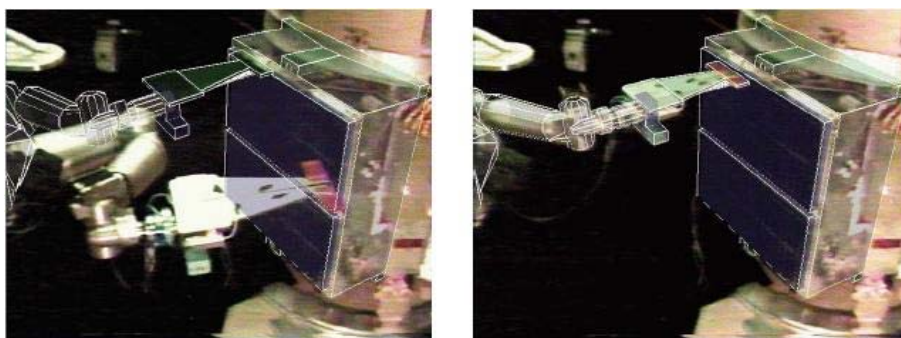


Figure 1.10. Utilisation de la prédiction graphique pour la téléopération spatiale, à gauche prédiction et confirmation de la tâche, à droite exécution.(image JPL)

– **Ergonomics in Teleoperation and Control Laboratory (ETCL Université de Toronto, Canada)** : Dans ce laboratoire, a été réalisé le système ARTEMIS (Augmented Reality TELeManipulation Interface System) [RAS 96]. Ce système permet de générer les modèles de l'environnement distant (non structuré) en utilisant la stéréovision. Il permet de superposer le modèle stéréographique du robot sur les images stéréovideo du site distant, le modèle stéréographique du robot est utilisé pour simuler les tâches de manipulation et des instructions sont ensuite envoyées au robot réel pour l'exécution.

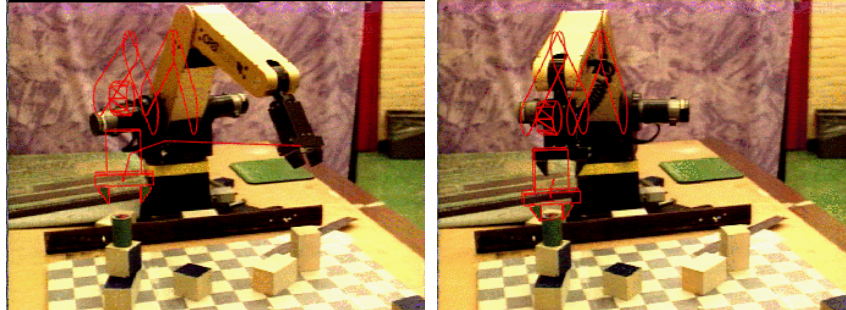


Figure 1.11. Utilisation de la prédiction graphique pour la téléopération dans un environnement non structuré, à gauche prédiction et confirmation de la tâche, à droite exécution.(image ETCL)

– **Electro Technical Laboratory (ETL Japon)** : Cette équipe réalise un système téléopéré pour l'assemblage et le désassemblage de pièces mécaniques avec supervision en vision synthétique [HAS 92]. Un module permet la modélisation interactive d'objets en utilisant la coopération d'une caméra et d'un télémètre laser. Un module de programmation permet, à l'aide d'un système de visualisation, de superposer l'image synthétique des objets modélisés à l'image vidéo. Enfin, un module d'exécution gère le manipulateur, le contrôleur de tâche ainsi que le transformateur de données.

– **Virtual Tools and Robotics Laboratory (Pennsylvania State University, USA)** : Les travaux réalisés par cette équipe [WAN 96] proposent une interface homme-machine utilisant des concepts de la réalité virtuelle et un système d'évitement d'obstacles afin de planifier les trajectoires d'un télémanipulateur en vue de la saisie d'objets. Le modèle virtuel d'une pince est superposé au départ à son image réelle. L'opérateur peut alors tester les configurations de saisie possibles à l'aide du modèle virtuel. Ceci permet de choisir un chemin de saisie optimum (sans collisions) et l'appliquer au bras réel.

– **Commissariat à l'Energie Atomique de Fontenay aux Roses (CEA, France)** : Un système de modélisation 3D « PYRAMIDE » [BON 93] et [EVE 99] a été développé au CEA. Trois sources d'informations coopèrent pour réaliser le système : la base de données géométrique 3D de l'environnement, les images que fournissent les caméras embarquées sur un robot mobile et les informations que peut fournir l'opérateur humain. Ces informations sont ensuite retournées à l'opérateur sous forme d'images synthétiques superposées à l'image vidéo [EVE 00] pour l'assister dans la programmation, l'exécution et la supervision des tâches.

– **Laboratoire d’Informatique, Biologie Intégrative et Système Complexe³⁹ (IBISC ex- LSC, France)** : Dans ce laboratoire à été développé le système MCIT (Multimedia Control Interface in Teleoperation) [MAL 93] et [LOU 93]. Ce système procure à l’opérateur une assistance à la perception et à la commande. Un module de reconnaissance de polyèdres à partir d’une images de luminance [SHA 01] a été développé et intégré à MCIT. Il permet la mise à jour de la base de données des objets pré-modélisés de l’environnement. La superposition des objets reconnus sur l’image de la scène apporte une aide visuelle à la perception. Ce système automatise des tâches fastidieuses imposées à l’opérateur comme par exemple l’appariement des primitives des objets vus par la caméra avec celles des modèles de la base de données 3D pour les identifier et les localiser.

Les travaux de recherches menés sur la problématique du télétravail en réalité augmenté [OTM 00c] (en particulier la téléopération via le réseau Internet) ont permis de mettre en place le système expérimental de téléopération ARITI [OTM 00a]. Il s’agit du premier système en France de téléopération de robot en réalité augmentée via le réseau Internet, accessible sur le site Web du laboratoire⁴⁰ depuis 1998 et sur le site de la NASA⁴¹ depuis janvier 2000. Les techniques utilisées ont permis d’apporter à l’opérateur en situation de télétravail, une assistance à la perception de l’environnement et à la commande d’un robot (en adaptant le concept des guides virtuels comme des outils d’assistance pour améliorer la précision et la sécurité du déroulement des tâches de téléopération [OTM 00b].

6. Synthèse et problématiques

Nous avons présenté une classification par domaines d’application de la téléopération, de la télérobotique, de la réalité virtuelle et augmentée.

Si nous examinons les types d’applications utilisant la réalité virtuelle, on se rend compte que le divertissement, les arts et l’éducation dominent ce marché. L’autre secteur important concerne la haute technologie comme l’aérospatial, la robotique, la médecine, les sciences ou le domaine militaire. On peut considérer que tous les domaines de la vie courante peuvent et pourront un jour être touché par la RV.

L’évolution de la technologie d’affichage et des systèmes informatiques, ainsi que le traitement temps réel d’images vidéo a rendu possible l’affichage d’images virtuelles correctement appariées aux images vidéo. La réalité augmentée a trouvé sa

³⁹ Nom du nouveau laboratoire depuis janvier 2006 après regroupement des deux laboratoires du CNRS (le LaMI : Laboratoire des Méthodes Informatique et le LSC : Laboratoire Systèmes Complexes).

⁴⁰ <http://lsc.univ-evry.fr/Projets/ARITI/>

⁴¹ http://ranier.oact.hq.nasa.gov/telerobotics_page/realrobots.html

place et a apporté des solutions à des problèmes rencontrés dans de nombreux domaines d'application. En particulier dans le domaine de la téléopération, la réalité augmentée est adoptée afin de palier certains problèmes liés généralement à la distance qui sépare le site maître (ou ce trouve l'utilisateur) du site esclave (ou se trouve le robot). En effet, la téléopération via un système de RA offre plusieurs avantages :

- délai invariant : L'opérateur reçoit un contrôle visuel depuis l'image graphique et non pas du site distant. Ainsi, les performances de l'opérateur ne sont pas affectées par le temps de réponse incertain (délai) ;
- affichage rehaussé : L'image vidéo est augmentée par la présence d'informations abstraites comme les distances entre objets du site distant, l'environnement du robot et l'affichage des trajectoires générées ;
- erreurs de manipulation réduites : La tâche de simulation réduit les erreurs de collision, les erreurs d'inattention et prévient aussi de certaines configurations indésirables ;
- niveau de contrôle très élevé : L'opérateur se trouve à l'extérieur de la boucle spatio-temporelle. Il contrôle le robot virtuel sur la machine locale, qui envoie ensuite des instructions de haut niveau à la machine distante ;
- modélisation partielle de l'environnement de la tâche : Des modèles partiels d'objets qui ont un rapport avec la tâche à exécuter peuvent être construits interactivement, on peut donc utiliser certaines procédures comme la détection de collisions par exemple.

Un aspect important de la téléopération assistée par la réalité augmentée concerne le problème de gestion des flux de données qui transitent entre les deux sites (maître, esclave). En effet, les systèmes de téléopération assistée par la RA utilisent des flux de données multimédias (vidéo, audio, etc.) qui transitent via un réseau de communication. Bien que la majorité des systèmes de RA pour la téléopération considèrent le retard de transmission comme *subit*, il reste néanmoins un des problèmes cruciaux en téléopération. Une des solutions pour pallier ce retour est d'avoir recours au retour prédictif visuel, concept implanté sur le système ARITI (§1.3.2.1), et qui permet à l'opérateur de poursuivre la téléopération même dans le cas où les retards de transmission du flux vidéo sont très importants.

Des solutions doivent aussi provenir dans le domaine des réseaux de télécommunication, en proposant des nouveaux protocoles et des solutions pour une gestion optimale et intelligente du réseau.

Nous avons également présenté une synthèse des systèmes de téléopération via Internet en présentant essentiellement quelques systèmes les plus aboutis et qui sont encore opérationnels sur le WEB. Une attention particulière est accordée aux travaux de Ken Goldberg avec les deux systèmes qui intègrent quelques

fonctionnalités de collaboration : les systèmes supportent plusieurs utilisateurs et possèdent un mécanisme de vote pour générer soit une commande à envoyer au robot (système Ouija2000), soit une décision sur la tâche que doit réaliser un utilisateur distant (système Tele-Actor).

Nous avons constaté également que ces systèmes ne supportent pas une réelle collaboration des utilisateurs à cause du manque de collecticiels dans le domaine de la téléopération. Nous avons pallié ces manques en proposant une solution basée sur un formalisme multi-agent pour la téléopération collaborative via Internet. L'ensemble de ce travail de recherche est résumé dans la présentation du système de téléopération collaborative via Internet ARITI-C (opérationnel depuis juillet 2005).

En effet, ARITI-C représente un collecticiel pour la téléopération dont la conception et la modélisation sont les résultats des recherches effectuées dans les deux domaines (TCAO et SMA) en proposant un système multi-agent pour la collaboration (SMA-C). Ce dernier étant implémenté, évalué et ensuite interfacé avec le système ARITI de base pour le rendre collaboratif. L'interface PHP et la base de données du système ARITI-C ont été conçues pour pouvoir suivre le fonctionnement du projet, et extraire des caractéristiques relatives aux missions et aux usagers : influence de paramètres de la mission sur les performances des usagers, influence de l'apprentissage pour un même usager ou groupe, influence de la composition du groupe, etc. Ceci permet d'évaluer la façon dont se construit la collaboration pour des tâches complexes et pour présumer de l'intérêt de porter le système sur d'autres types de missions.

Les caractéristiques principalement visées sont :

- l'importance relative des différents espaces de la collaboration (communication, coordination, production). Pour cela, les durées de chaque phase sont mesurées, ainsi que le nombre de messages échangés (faute de pouvoir quantifier concrètement le nombre d'informations échangées réellement ;
- la façon dont les espaces de collaboration changent d'importance en fonction de l'expérience des usagers. A terme, on suppose que l'essentiel du temps sera passé en production, une fois que chaque usager est habitué aux missions et que chacun sait à quelles tâches il excelle ou lesquelles il préfère. On peut imaginer à terme que le système proposera aux usagers une répartition idéale des tâches en fonction de leur expérience ;
- la difficulté d'une mission ou sa complexité de façon quantifiée. On suppose que des missions similaires auront un même profil en termes de durée, de répartition des espaces, etc. ;
- l'influence de l'ergonomie sur les performances. Alors que l'on suit l'évolution des statistiques, on peut déterminer le bon ou le mauvais fonctionnement de certains points voire tester des alternatives, afin de rendre optimal le maniement du collecticiel.

Les systèmes de téléopération via Internet ainsi que les expériences décrites dans ce chapitre, n'abordent pas le problème de la qualité de service (QoS : Quality of Service en anglais) à l'exception des travaux de l'équipe de E-productique de Brest [LEP 04] qui propose d'intégrer la problématique de QoS pour le contrôle de systèmes mécaniques à distance. En effet, Internet est un vaste réseau informatique interconnectant des centaines de milliers d'utilisateurs et de machines. Lorsque l'on émet un message sur ce réseau, celui-ci est d'abord traité par la machine locale, puis il est transmis à une succession de routeurs. Il passe ainsi de machine en machine jusqu'à la machine destinataire d'un autre utilisateur ou celle reliée au robot téléopéré.

Il n'existe pas encore de modèle de l'Internet permettant de prédire le temps d'acheminement d'un message, malgré les nombreux travaux dans ce domaine [FLO 01] et [FIR 02]. Dans le cas général, on parlera donc d'un réseau sans QoS. Contrairement donc aux réseaux industriels, qui eux peuvent garantir des temps d'acheminement et de gigue, l'Internet doit donc être considéré comme une boîte noire dans laquelle un message entre et peut ressortir. Cette absence de QoS peut apparaître comme incompatible avec les applications temps réelles et en particulier celles utilisant Internet pour la téléopération de robots.

L'absence de la QoS dans ce type d'application empêcherait le bon fonctionnement de certaines missions de téléopération et en particulier celles de la téléopération collaborative qui nécessitent des flux importants de données (images vidéo, audio, retour haptique, etc.) à partager et à distribuer entre plusieurs utilisateurs distants.

Le problème de la QoS monte donc au premier plan des préoccupations des chercheurs et développeurs d'application de télétravail en général et de la téléopération via Internet en particulier. *Comment mettre en place, autoriser, administrer, gérer la qualité de service ?* sont autant de thèmes sur lesquels les chercheurs et développeurs dans le domaine du réseau travaillent.

7. Bibliographie

7. 1. Sur la téléopération, télérobotique, réalité virtuelle et réalité augmentée

[AND 97] ANDRIOT C., « Automatique des systèmes de téléopération avec retour d'effort : limitation des performances », *Thèse de doctorat*, Université Pierre et Marie Curie, 1997.

[BEJ 90] BEJCZY A., KIM W., and VENEMA S., « The phantom robot: Predictive displays for teleoperation with time delay », *IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA '90*, p. 546-551, 1990.

[BEJ 92] BEJCZY A., « Teleoperation : The language of the human hand », *IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, ROMAN'92*, p. 32-43, september, 1-3, Tokyo, Japan, 1992.

[BIL 05] BILLINGHURST M., GRASSET R., LOOSER J., « Designing Augmented Reality Interfaces » *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, p. 17-22, 2005

[BON 93] BONNEAU P., EVEN P., « Man-machine cooperation for 3d objects pose estimation », *IEEE SMC Conference*, v. 2, p. 194-299, 1993.

[CAM 94] CAMMOUN, DTRICHE, LAUTURE, et LESIGNE « Telerobotics in the service of disabled persons » *ORIA'94 de la téléprésence vers la réalité virtuelle, 5ème colloque international et convention d'affaires*, p. 249-254, décembre, Marseille, 1994.

[COI 02] COIFET P., et KHEDDAR A., « Téléopération et télérobotique », *Traité IC2, série Systèmes automatisés*, Hermès, 2002.

[DEL 93] DELARMINA P., « Automatique : commande des systèmes linéaires » Hermes, 1993.

[EVE 00] EVEN P., FOURNIER R., GELIN R., « Using structural knowledge for interactive 3-D modeling of piping environments », *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2000)*, San Francisco, California , p. 2013-2018, April 2000.

[EVE 99] EVEN P., GRAVEZ P., MAILLARD E., FOURNIER R., « Acquisition and exploitation of a 3D environment model for Computer Aided Teleoperation », *Proceedings of the International Workshop on Robot and Human Interaction (ROMAN '99)*, Pisa, Italy , p. 261-266, September 1999.

[FEI 93] FEINER S., MACINTYRE B., SELIGMAN D., « Knowledge-based augmented reality » *Communications of the ACM*, p.52-62, July 1993.

[FER 65] FERELL W. R., « Remote manipulation with transmission delay », *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, v. 6, p. 24-32, september 1965.

[FRE 93] FREEDMAN P., « Robotics in the 1990's : An overview of current trends », *IEEE Canadian review*, 1993.

- [FUC 03] FUCHS P., MOREAU G., « Le traité de la réalité virtuelle » v.1, *Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris*, 2003 (2ème édition).
- [GAL 89] GALERNE S., « Architecture ouverte de la commande adaptée à la robotique de coopération h/m. Application au domaine médicale », *Thèse de doctorat*, Université Paris XII, 1989.
- [GHO 02] GHODOUSSI M., BURTNER S. E., WANG Y., « Robotic surgery- the transatlantic case. *IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA'02*, p. 1882-1888, 2002.
- [GRA 93] GRACE, VULKOVICH, and CHUN, « A six degree of freedom micromanipulator for ophthalmic surgery », *IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA'93*, p. 630-635, Atlanta, USA, 1993.
- [GUT 00] GUTHART G., SALISBURY J.K., « The intuitive telesurgery system: overview and applications », *IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA'00*, San Francisco, p. 618-621, 2000.
- [HAS 92] HASEGAWA T., SUEHIRO T., TAKASE K., « A model-based manipulation system with skill-based execution », *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, v. 8, p. 535-544, 1992.
- [HOP 01] HOPPENOT P., COLLE E., AIT AIDER O., RYBARCZYK Y. « ARPH - Assistant Robot for Handicapped People - A pluridisciplinary project » *IEEE Roman'2001, Bordeaux and Paris*, p. 624-629, 18-21 Sept 2001.
- [HUN 94] HUNTER, JONES, SAGAR « A teleoperated microsurgical robot and associated virtual environment for eye surgery », *PRESENCE*, v. 2, N° 4, p. 265-280, 1994.
- [KHE 02] KHEDDAR A., et COIFFET P., « Téléopération et réalité virtuelle », *Traité IC2, série Systèmes automatisés*, Hermès, 2002.
- [KIM 93] KIM W. S., « Graphical operator interface for space telerobotics », *IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA'93*, p. 761-768, 1993.
- [KOR 85] KOREN Y., « Robotics for engineers », *McGraw-Hill editor*, New York, USA, 1985.
- [KOS 96] KOSUGE K., MURAYAMA H., et TAKEO T., « Bilateral feedback control of telemanipulators via computer network », *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, IROS'96*, v. 3, p. 1380-1385, Osaka, Japan, 1996.
- [KRU 03] KRUPA A., « Commande par vision d'un robot de chirurgie laparoscopique », *Thèse de doctorat*, Institut National Polytechnique de Lorraine, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 2003.
- [LED 94] LEDRMAN S., and KLAZKY, R., « The intelligent hand: An experimental approach to human object recognition and implications for robotics and ai », *AI Magazine*, 1994.
- [LOU 93] LOUKIL A., « Interface Homme-machine de Contrôle Commande en Robotique téléopérée », *Thèse de doctorat*, Université d'Evry Val d'Essonne, 1993.

- [MAL 92] MALLEM M., CHAVAND F., COLLE E., « Computer-assisted visual perception in teleoperated robotics », *Robotica Journal*, v. 10, p. 93-103, 1992.
- [MAL 93] MALLEM M., ROUGEAUX S., MELLANGER H., « A trajectory generation module for 2d and 1/2 environment » *IEEE Computers in design, manufacturing and production, 7th Annual European Computer conference*, p. 24-27, May, 1993.
- [NOY 84] NOYES M., SHERIDAN T., « A novel predictor for telemanipulation through a time delay », *Annual Conference Manual Control*, Moffett Field, CA, NASA Ames Research Center, 1984.
- [OTM 00a] OTMANE S., MALLEM M., KHEDDAR A., CHAVAND F., « ARITI : an Augmented Reality Interface for Teleoperation on the Internet », *Advanced Simulation Technologies Conference.*, p. 254-261, April 16-20, Wyndham City Center Hotel, Washington, D.C., USA, 2000.
- [OTM 00b] OTMANE S., MALLEM M., KHEDDAR A., CHAVAND F., «Active virtual guide as an apparatus for augmented reality based telemanipulation system on the Internet », *IEEE Computer Society, 33rd Annual Simulation Symposium ANSS 2000*, p. 185-191, April 16-20, 2000, Wyndham City Center Hotel, Washington, D.C., USA, 2000.
- [OTM 00c] OTMANE S. « Télétravail robotisé et réalité augmentée : application à la téléopération via Internet », *Thèse de doctorat*, Université d'Evry, 2000.
- [OYA 92] OYAMA E., TSUNEMOTO N., TACHI S., INOUE Y., « Remote manipulation using virtual environment », *2nd International symposium on measurement and control in robotics » ISMCR'92*, p. 311-318, Tsukuba Science city, Japan, 1992.
- [RAS 96] RASTOGI A., MILGRAM P., DRASIC D., GRODSKI J. J., « Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems III », *SPIE v. 2653*, Mark T. Boalas and Scott S. Fisher and John O. Merritt, San Jose, California, USA, 1996.
- [RYB 02] RYBARCZYK Y., AIT AIDER O., HOPPENOT P. et COLLE E., « Remote control of a biomimetics robot assistance system for disabled persons » *AMSE, special issue – bioengineering applied to handicap rehabilitation*, p. 47-56, 2002.
- [SAY 95] SAYER C., LAI A., et PAUL R «Visual imagery for subsea teleprogramming », *IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA*, 1995.
- [SHA 01] SHAHEEN M., MALLEM M., CHAVAND F., «Visual command of a robot using 3D scene reconstruction in an augmented reality system », *Control Engineering Practice*, v. 9, N. 4, p. 375-385, Avril, 2001.
- [SHE 93] SHERIDAN T., « Space teleoperation through time delay: Review and prognosis », *IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA '93*, p. 592-606, 1993.
- [SPO 93] SPONG M., « Communication delay and control in telerobotics », *Journal of the Robotics Society of Japan*, v. 11, N°. 6, p. 803-810, 1993.
- [VER 84] VERTUT J., et COIFFET P., « Les Robots: Téléopération »,v. 3A, et 3B, Hermès, 1984.

[WAN 96] WANG C., CANNON D. J., MA H., « A human-machine system interacting virtual tools with a robotic collision avoidance concept using conglomerates of spheres », *Journal in Teleoperation*, 1996.

7. 2. Sur la téléopération via Internet, travail collaboratif

[BAC 98] BACKES P. G., TSO K. S., THARP G. K., « Mars Pathfinder Mission Internet-Based Operations Using WITS », *IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA*, 1998.

[BEL 96] BELLAMINE N., « Contributions Méthodologiques à la Conception de Collecticiels : Application Aux Réunions de Planification Coopérative Du Satellite Multi-Instrument SOHO », *Thèse de doctorat en informatique*, Université Toulouse 1. 1996.

[BOW 95] BOWERS J. et BUTTON G., « Workflow from Within and Without », *European Conference on Computer Supported Cooperative Work (ECSCW 95)*, p. 51-66, 1995.

[BRA 98] BRAVE S., ISHII H. et DAHLEY A., « Tangible Interfaces for Remote Collaboration and Communication », *ACM Computer Supported Cooperative Work (CSCW 98)*, p. 169-178, 1998.

[CAL 97] CALVARY G., COUTAZ J. et NIGAY L., « From Single-User Architectural Design to PAC*: A Generic Software Architecture Model for CSCW », *Proceedings of the ACM CHI 97*, p. 242-249, Mars 1997.

[CAR 99] CARRE P., CASPAR P., « Traité Des Sciences et Des Techniques de la Formation », Paris, Editions Dunod, 1999.

[COL 92] COLEMAN D. et SHAPIRO R., « Defining Groupware », *Special Advertising Section to Network World*, Juin, 1992.

[COU 99] COUTAZ J., BERARD F., CARRAUX E., ASTIER W., « CoMedi : Using Computer Vision to Support Awareness and Privacy in Mediaspaces », *ACM Conference on Human Factors and Computing Systems (CHI 99)*, p.13-14, ACM press, 1999.

[DAV 92] David B.T. & DUBY J-C. (coordonateurs), Collecticiel, IHM'92, *Compte rendu des ateliers. 4^e Journées sur l'ingénierie des IHM*, Telecom Paris, p. 59-88, 1992.

[DOU 92] DOURISH P. et BLY S., « Portholes: Supporting Awareness in a Distributed Work Group », *ACM Conference on Human Factors and Computing Systems (CHI 92)*, p. 541-547, 1992.

[DOU 96] DOURISH P., « Consistency Guarantees : Exploiting Application Semantics Consistency Management in a Collaboration Toolkit », *ACM Computer Supported Cooperative Work (CSCW 96)*, p. 268-277, 1996.

[ELL 91] ELLIS C., GIBBS S., SIMON., REIN G., « Groupware: Some Issues and Experiences », *Journal, Communications of the ACM (CACM)*, 34, 1, 38-58, 1991.

- [ELL 94] ELLIS C. A. et WAINER J., « A Conceptual Model of Groupware », *ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW 94)*, p. 79-88, Chapel-Hill, North Carolina, USA, 1994.
- [ELL 99] ELLIS C., « Workflow technology ». In *Computer Supported Co-operative Work*, M. Beaudouin-Lafon, Ed., of *Trends in Software*, vol. 7, p. 29-54, John Wiley & Sons, 1999.
- [FER 97] FERBER J., « Les Systèmes Multi-Agents : Un Aperçu Général », *Revue Techniques et Sciences Informatiques*, v. 16, n.8, 1997.
- [FIR 02] FIROIU V., BOUDEC J. L., TOWSLEY D., ZHANG Z., « Theories and models for internet quality of service », *Proceedings of the IEEE*, v. 90, n.9, p. 1565-1591, 2002.
- [FLO 01] FLOYD S., PAXSON V., « Difficulties in simulating the Internet », *IEEE/ACM Transaction on Networking*, vol. 9, p. 392-403, 2001.
- [FRA 03] FRAISSE P., AGNIEL C., ANDREU D., DE LOS RIOS J. S., « Teleoperations over IP Network : Virtual PUMA Robot », *International Conference on Industrial Technology ICIT'03*, Maribor - Slovénie, décembre 2003.
- [GNA 03] GNAEDINGER E., MICHAUT F., LEPAGE F., « Implémentation d'une architecture de Qds spécifique permettant l'adaptation d'une application de contrôle à distance d'un robot mobile », *Quatrième Conférence Internationale sur l'Automatisation Industrielle*, Montréal, Canada, juin 2003.
- [GOL 00] GOLDBERG K., CHEN B., SOLOMON R., BUI S., FARZIN B., HEITLER J., POON D., SMITH G., « Collaborative Teleoperation Via the Internet », *IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA*, 2000.
- [GOL 01] GOLDBERG K., « The Tele-Actor: A New Framework for Collaborative Telepresence », *Conference on Computer Human Interaction CHI*, Seattle, Washington, 2001.
- [GOL 01] GOLDBERG K., SIEGWART R., « Beyond Webcams : an introduction to online robots », *The MIT Press*, 2001.
- [GOL 02] GOLDBERG K., SONG D., KHOR Y., PESCOVITZ D., LEVANDOWSKI, HIMMELSTEIN J., SHIH J., HO A., PAULO E., « Collaborative Online Teleoperation with Spatial Dynamic Voting and a Human : Tele-Actor », *IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA*, 2002.
- [GOL 04] GOLDBERG K., SONG D., YONG SONG I., MCGONIGAL J., ZHENG W., PLAUTZ D., « Unsupervised scoring for scalable internet-based collaborative teleoperation », *IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA*, 2004.
- [GOL 95] GOLDBERG K., MASCHA M., GETNER S., ROTHENBERG N., « Desktop Teleoperation Via the World Wide Web », *IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA*, 1995.
- [GOL 96] GOLDBERG K., SANTARROMANA J., « The Telegarden », <http://telegarden.aec.at/>, 1996.
- [GRU 94] GRUDIN J., « CSCW : History and Focus », *Journal, IEEE Computer*, v.27, n.5, p. 19-26, 1994.

- [ISH 94] ISHII H., KOBAYASHI M., ARITA K., « Iterative Design of Seamless Collaborative Media », *Journal Communications of the ACM*, v.37, n.8, p.83-97, 1994.
- [KHE 05] KHEZAMI N., « vers un collecticiel basé sur un formalisme multi-agent destiné à la téléopération collaborative via Internet », *Thèse de doctorat*, Université d'Evry, décembre 2005.
- [KHE 05a] KHEZAMI N., OTMANE S., MALLEM M., « A new Formal Model of Collaboration by Multi-Agent Systems », *IEEE International Conference on Integration of Knowledge Intensive Multi-Agent Systems (IEEE KIMAS 05)*, p. 32-37, April 18-21, Waltham, Massachusetts, USA, 2005.
- [KHE 05b] KHEZAMI N., OTMANE S., MALLEM M., « An Approach to Modelling Collaborative Teleoperation », *12th IEEE International Conference on Advanced Robotics (ICAR 05)*, July 18-20, Seattle, Washington, USA, 2005.
- [KHE 05c] KHEZAMI N., OTMANE S., MALLEM M., « Modelling and Evaluation of a Multi-Agent System for a Collaboration », *International Federation of Automatic Control (PRAHA IFAC World Congress)*, July 3-8, PRAHA, Czech Republic, 2005.
- [KHE 05d] KHEZAMI N., OTMANE S., MALLEM M., «A New Interface for Collaborative Teleoperation», *International Federation of Automatic Control (PRAHA IFAC World Congress)*, July 3-8, PRAHA, Czech Republic, 2005.
- [LAU 02] LAURILLAU Y., « Conception et Réalisation Logicielles Pour Les Collecticiels Centrées sur L'activité de Groupe : Le Modèle et la Plate-Forme Clover », *Thèse de doctorat en informatique*, Université Joseph Fourier - Grenoble I, 2002.
- [LEL 03] LELEVÉ A., PRÉVOT P., SUBAI C., NOTERMAN D., GUILLEMOT M., « Towards remote laboratory platforms with dynamic scenarios », *7th world Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI 2003)*, Orlando - Floride, juillet 2003.
- [LEP 02] LE PARC P., OGOR, P., VAREILLE J., MARCE L., « Web based remote control of the mechanical systems », *IEEE International Conference on Software Telecommunications and Computer Networks*, Split, Croatie, 2002.
- [LEP 04] LE PARC P., VAREILLE J. et MARCE L., « E-productique ou contrôle et supervision distante de systèmes mécaniques sur l'internet », *Journal européen des systèmes automatisés (JESA)*, v.38, n. 5, p. 525-558, 2004.
- [OTM 00a] OTMANE S., MALLEM M., KHEDDAR A., CHAVAND F., « ARITI : an Augmented Reality Interface for Teleoperation on the Internet », *Advanced Simulation Technologies Conference*, p. 254-261, April 16-20, Wyndham City Center Hotel, Washington, D.C., USA. 2000.
- [PAL 02] PALEN L., GRUNDIN J., « Discretionary Adoption of Group Support Software: Lessons from Calendar Applications, Organizational implementation of collaboration technology » *Munkvold éditeur*, 2002.
- [SAU 00] SAUCY P., MONDADA F., « KhepOntheWeb : Open access to a mobile robot on the Internet. », *IEEE robotics and automation magazine*, 2000, p. 41-47.

[SIR 00] SIRE S., « La Collaboration Directe : Un Paradigme D'interaction Pour Le Travail Collaboratif Assisté Par Ordinateur », *Thèse de doctorat en informatique*, Université Toulouse 1, 2000.

[STE 98] STEIN M., « Painting on the world wide web : the PumaPaint project. », *In Proceeding of the IEEE IROS'98 Workshop on Robots on the Web*, octobre 1998.

[TAR 97] TARPIN-BERNARD F., « Travail Coopératif Synchronisé Assisté Par Ordinateur : Approche AMF-C », *Thèse de doctorat Informatique*, Ecole Centrale de Lyon, 1997.

[TAY 95] TAYLOR K., TREVELYAN J., « Australia's Telerobot On The Web », *26th International Symposium On Industrial Robots, Singapore*, 1995.

[TAY 97] TAYLOR K., DALTON B., « Issues in Internet telerobotics. », *FSR'97 International Conference on Field and Service Robots*, 1997.